

预应力混凝土结构技术规程

山东省工程建设标准



DB37/T 5201-2021

备案号 J 16710-2021

预应力混凝土结构技术规程

Technical specification for prestressed concrete structures

2021-12-08 发布

2022-03-01 实施

山东省住房和城乡建设厅
山东省市场监督管理局

联合发布

中国建筑工业出版社



统一书号: 15112·38338
定 价: 90.00 元

山东省工程建设标准

预应力混凝土结构技术规程

Technical specification for prestressed concrete structures

DB37/T 5201 - 2021

批准部门：山东省住房和城乡建设厅

山东省市场监督管理局

施行日期：2022年3月1日

中国建筑工业出版社

2021 北 京

山东省工程建设标准
预应力混凝土结构技术规程

Technical specification for prestressed concrete structures

DB37/T 5201 - 2021

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

印刷厂印刷

*

开本：850毫米×1168毫米 1/32 印张：9 字数：239千字

2022年3月第一版 2022年3月第一次印刷

定价：**90.00**元

统一书号：15112·38338

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社图书出版中心退换

（邮政编码 100037）

本社网址：<http://www.cabp.com.cn>

网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

前 言

根据山东省住房和城乡建设厅、山东省市场监督管理局《关于印发〈关于 2018 年第二批山东省工程建设标准制修订计划〉通知》（鲁建标字〔2018〕17 号）要求，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国家和行业相关标准、规范，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程的主要技术内容是：总则、术语和符号、材料、结构设计、预应力损失值计算、承载能力极限状态计算、正常使用极限状态验算、装配式预应力混凝土水平叠合构件设计、超长结构的预应力设计、城市道路桥梁预应力混凝土结构、预应力混凝土结构主要构造规定、预应力混凝土结构施工、检验与验收以及有关附录。

本规程由山东省住房和城乡建设厅负责管理，由济南大学负责具体技术内容的解释。

本规程在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，及时将修改意见寄送至济南大学（济南市南辛庄西路 336 号，邮编 250022，联系电话：0531-82765943，邮箱：cea _ gaof@ujn.edu.cn）以便今后修订。

本 规 程 主 编 单 位：济南大学
山东大学

本 规 程 参 编 单 位：同济大学
山东省交通规划设计院集团有限公司
泰安市泰山区城市建设指导服务中心
中国矿业大学
上海同吉建筑工程设计有限公司
荣华建设集团有限公司

青岛九屋建筑安装有限公司
中建科技集团有限公司
苏州科技大学

本规程主要起草人员：高 峰 侯和涛 熊学玉 徐 召
范春雷 谢 群 陈圣刚 苑 辉
杨令强 秦 磊 汪继恕 彭晓彤
徐常泽 李海生 牟银林 陈 骁
李 辉 周 健 刘其方 柳忠东
陈营明 姚刚峰

本规程主要审查人：李晨光 蒋世林 王清标 王 健
嵇 飙 李当生 孙 杰 高培法
荣 杰

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	5
3	材料	11
3.1	混凝土及预应力筋	11
3.2	预应力用锚具、夹具和连接器	12
3.3	成孔用管料	13
3.4	锚垫板	14
3.5	灌浆材料	14
3.6	缓粘结预应力筋	15
4	结构设计	18
4.1	一般规定	18
4.2	结构内力分析	20
4.3	施工阶段验算	21
4.4	建筑及桥梁结构设计	22
5	预应力损失值计算	24
5.1	一般规定	24
5.2	预应力损失值计算	25
6	承载能力极限状态计算	34
6.1	正截面受弯承载力计算	34
6.2	正截面受拉承载力计算	37
6.3	正截面受压承载力计算	39
6.4	斜截面承载力计算	42
6.5	局部承压及冲切计算	47

7	正常使用极限状态验算	55
7.1	一般规定	55
7.2	预应力度验算	55
7.3	应力验算	56
7.4	变形验算	62
7.5	裂缝控制验算	67
8	装配式预应力混凝土水平叠合构件设计	75
8.1	一般规定	75
8.2	预应力叠合构件承载力计算	75
8.3	预应力叠合构件正常使用极限状态验算	77
8.4	预应力叠合构件构造要求	79
9	超长结构的预应力设计	81
9.1	一般规定	81
9.2	超长结构计算原则	81
9.3	超长结构线型布置方法	85
9.4	超长结构构造措施	86
10	城市道路桥梁预应力混凝土结构	89
10.1	一般规定	89
10.2	构造规定	91
10.3	施工要求	95
10.4	健康监测	97
11	预应力混凝土结构主要构造规定	100
11.1	一般规定	100
11.2	先张法构件	101
11.3	后张法构件	103
11.4	无粘结预应力构件	107
11.5	缓粘结预应力构件	108
12	预应力混凝土结构施工	112
12.1	一般规定	112
12.2	预应力筋的制作与铺设	113

12.3	混凝土浇筑	115
12.4	张拉	116
12.5	灌浆	120
12.6	封锚	123
12.7	体外预应力束施工	123
12.8	缓粘结预应力混凝土结构施工	125
12.9	施工管理	128
13	检验与验收	131
13.1	一般规定	131
13.2	原材料	131
13.3	制作与安装	134
13.4	张拉与放张	135
13.5	灌浆及封锚	137
13.6	检测	138
13.7	机具标定	140
13.8	工程验收	140
附录 A	体外预应力混凝土构件设计	142
附录 B	预应力型钢混凝土结构构件设计	150
附录 C	预应力钢与混凝土组合结构构件设计	161
附录 D	数控张拉	167
附录 E	张拉阶段预应力损失测定方法	172
附录 F	预应力筋张拉记录表	180
附录 G	有粘结预应力结构灌浆记录	182
	本规程用词说明	183
	引用标准名录	184
	附：条文说明	187

1 总 则

1.0.1 为规范山东省预应力混凝土结构设计、施工、检验、监测和验收，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量，特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于建筑工程、市政工程和城市桥梁等预应力混凝土的结构设计、施工、检验、监测和验收。

1.0.3 本规程是依据国家标准《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068 和《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 规定的原则制定。主要术语、符号符合国家标准的规定。

1.0.4 预应力混凝土结构的抗震设计应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 及行业标准《预应力混凝土结构抗震设计标准》JGJ/T 140 的有关规定。

1.0.5 在水下或高腐蚀环境中的结构构件、人防结构不应采用无粘结预应力结构。

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

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 预应力混凝土结构 prestressed concrete structure

由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。

2.1.2 先张法预应力混凝土结构 pre-tensioned prestressed concrete structure

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结构。

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

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

2.1.4 预应力筋 prestressing tendon

用于混凝土结构构件中施加预应力的钢筋、钢丝、钢绞线和钢棒的总称。

2.1.5 有粘结预应力筋 bonded prestressing tendon

张拉后直接与混凝土粘结或通过灌浆使之与混凝土粘结的一种预应力筋。

2.1.6 无粘结预应力筋 unbonded prestressing tendon

表面涂防腐油脂并包塑料护套后，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。

2.1.7 无粘结预应力混凝土结构 unbonded prestressed concrete structure

在一个方向或两个方向配置主要受力无粘结预应力筋的预应力混凝土结构。

2.1.8 体外预应力筋 external prestressing tendon

布置在结构构件截面之外的预应力筋。通过与结构构件相连的锚固端块和转向块将预应力传递到结构上。

2.1.9 体外预应力结构 externally prestressed structure

由布置在混凝土构件截面之外的后张预应力筋产生预加应力的结构。

2.1.10 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到构件或结构上所采用的永久性锚固装置。

2.1.11 夹具 grip

先张法预应力构件或结构施工时，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临时性锚固装置。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临时性锚固装置。

2.1.12 连接器 coupler

连接预应力筋的装置。

2.1.13 预应力筋—锚具组零件 prestressing tendon-anchorage assembly

单根或成束预应力筋与安装在两端部的锚具组装而成的受力单元。

2.1.14 张拉控制应力 control stress for tensioning

预应力筋张拉时在张拉端所施加的应力值。可作为计算预应力损失的起点。

2.1.15 预应力损失 prestressing loss

预应力筋张拉过程中和张拉后，由于材料特性、结构状态和张拉工艺等因素引起的预应力筋应力降低的现象。预应力损失包括：摩擦损失、锚固损失、弹性压缩损失、热养护损失、预应力筋应力松弛损失和混凝土收缩徐变损失等。

2.1.16 有效预应力 effective prestress

预应力损失完成后，在预应力筋中保持的应力值。

2.1.17 预应力强度比 ratio of prestressing strength

预应力筋合力对混凝土受压区边缘的弯矩与预应力筋合力、非预应力钢筋合力对混凝土受压区边缘的弯矩之和的比值。

2.1.18 次内力 secondary internal force

超静定预应力混凝土由于结构的自身约束或相邻部件的约束而引起的结构附加内力，包括次弯矩、次轴力、次剪力及次扭矩等。

2.1.19 检验 inspection

对被检验项目的特征、性能进行量测、检查、试验等，并将结果与标准规定的要求进行比较，以确定项目每项性能是否合格的活动。

2.1.20 检验批 inspection lot

按相同的生产条件或规定的方式汇总起来供抽样检验用的、由一定数量样本组成的检验体。

2.1.21 验收 acceptance

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

2.1.22 主控项目 dominant item

建筑工程中对安全、节能、环境保护和主要使用功能起决定性作用的检验项目。

2.1.23 一般项目 general item

除主控项目以外的检验项目。

2.1.24 预应力型钢混凝土结构 prestressed steel concrete structure

配置预应力筋并经过张拉建立预加应力的型钢混凝土结构。

2.1.25 预应力钢与混凝土组合结构 prestressed steel-concrete composite structure

配置预应力筋并经过张拉建立预加应力的钢与混凝土组合

结构。

2.1.26 缓粘结预应力筋 retard-bonded tendon

用缓粘结专用粘合剂涂敷和高密度聚乙烯护套包裹的预应力筋。

2.1.27 数控张拉设备 numerical control equipment

数控张拉设备，是采用了逻辑数字化电控部件、控制面板、遥控器、实时通信组件等组成的张拉设备系统。

2.1.28 数控张拉力 numerical control prestressing force

由数控张拉设备控制的千斤顶对预应力筋施加的张拉力，该张拉力的目标值在张拉前由施工人员输入数控张拉设备，且在张拉过程中由数控张拉设备实时监控并记录。

2.1.29 数控张拉力值偏差 deviation of numerical control prestressing force

数控张拉设备输出的数控张拉力的显示值与参数预设控制力的目标值之间的偏差。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能

E_c ——混凝土弹性模量；

E_c^f ——混凝土疲劳变形模量；

E_s ——钢筋弹性模量；

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

$f_{cu,k}$ ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度标准值；

f_{ck} 、 f_c ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

f_{tk} 、 f_t ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；

f'_{ck} 、 f'_{tk} ——施工阶段的混凝土轴心抗压、轴心抗拉强度标准值；

f_{yk} 、 f_{ptk} ——普通钢筋、预应力筋强度标准值；

f_y 、 f'_y ——普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值；

f_{py} 、 f'_{py} ——预应力筋的抗拉、抗压强度设计值。

2.2.2 作用、作用效应及承载力

N ——轴向力设计值；

N_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次轴力；

N_k 、 N_q ——按荷载效应的标准组合，准永久组合计算的轴向力值；

N_p ——后张法构件预应力筋及普通钢筋的合力；

N_{p0} ——混凝土法向预应力等于零时预应力筋及普通钢筋的合力；

N_{u0} ——构件的截面轴心受压或轴心受拉承载力设计值；

N_{ux} 、 N_{uy} ——轴向力作用于 x 轴、 y 轴的偏心受压或偏心受拉承载力设计值；

M ——弯矩设计值；

M_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次弯矩；

M_k 、 M_q ——按荷载效应的标准组合、准永久组合计算的弯矩值；

M_u ——构件的正截面受弯承载力设计值；

M_{cr} ——受弯构件的正截面开裂弯矩值；

T ——扭矩设计值；

V ——剪力设计值；

V_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次剪力；

V_{cs} ——构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值；

F_l ——局部荷载设计值或集中反力设计值；

σ_{ck} 、 σ_{cq} ——荷载效应的标准组合、准永久组合下抗裂验算边缘的混凝土法向应力；

σ_{pc} ——由预加力产生的混凝土法向应力；

σ_{tp} 、 σ_{cp} ——混凝土中的主拉应力、主压应力；
 $\sigma_{c,max}^f$ 、 $\sigma_{c,min}^f$ ——疲劳验算时受拉区或受压区边缘纤维混凝土的最大应力、最小应力；
 σ_s 、 σ_p ——正截面承载力计算中纵向普通钢筋、预应力筋的应力；
 σ_{sk} ——按荷载效应的标准组合计算的纵向受拉钢筋应力或等效应力；
 σ_{con} ——预应力筋张拉控制应力；
 σ_{p0} ——预应力筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋应力；
 σ_{pe} ——预应力筋的有效预应力；
 σ_{pu} ——无粘结预应力筋和体外预应力筋的应力设计值；
 σ_l 、 σ'_l ——受拉区、受压区预应力钢筋在相应阶段的预应力损失值；
 τ ——混凝土的剪应力；
 ω_{max} ——按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度。

2.2.3 几何参数

a 、 a' ——纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离；
 a_s 、 a'_s ——纵向非预应力受拉钢筋合力点、纵向非预应力受压筋合力点至截面近边的距离；
 a_p 、 a'_p ——受拉区纵向预应力筋合力点、受压区纵向预应力筋合力点至截面近边的距离；
 b ——矩形截面宽度，T形、I形截面的腹板宽度；
 b_f 、 b'_f ——T形或I形截面受拉区、受压区的翼缘宽度；
 d ——钢筋直径或圆形截面的直径；
 c ——混凝土保护层厚度；
 e 、 e' ——轴向力作用点至纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点的距离；

e_0 ——轴向力对截面重心的偏心距；
 e_a ——附加偏心距；
 e_i ——初始偏心距；
 h ——截面高度；
 h_0 ——截面有效高度；
 h_p ——纵向受拉预应力筋合力点至梁截面受压边缘的有效距离；
 h_s ——纵向受拉普通钢筋合力点至梁截面受压边缘的有效距离；
 h_f 、 h'_f ——T形或I形截面受拉区、受压区的翼缘高度；
 i ——截面的回转半径；
 r_c ——曲率半径；
 l_a ——纵向受拉钢筋的锚固长度；
 l_0 ——梁板的计算跨度或柱的计算长度；
 s ——沿构件轴线方向上横向钢筋的间距，螺旋筋的间距或箍筋的间距；
 x ——混凝土受压区高度；
 y_0 、 y_n ——换算截面重心、净截面重心至所计算纤维的距离；
 z ——纵向受拉钢筋合力至混凝土受压区合力点之间的距离；
 A ——构件截面面积；
 A_0 ——构件换算截面面积；
 A_n ——构件净截面面积；
 A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；
 A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积；
 A_{svl} 、 A_{stl} ——受剪、受扭计算中单肢箍筋的截面面积；
 A_{stl} ——受扭计算中取用的全部受扭纵向普通钢筋的截面面积；
 A_{sv} 、 A_{sh} ——同一截面内各肢竖向、水平箍筋或分布钢筋的全

部截面面积；

A_{sb} 、 A_{pb} ——同一弯起平面内非预应力、预应力弯起钢筋的截面面积；

A_l ——混凝土局部受压面积；

A_{cor} ——钢筋网、螺旋筋或箍筋内表面范围内的混凝土核心面积；

B ——受弯构件的截面刚度；

W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

W_0 ——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

W_n ——净截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

W_t ——截面受扭塑性抵抗矩；

I ——截面惯性矩；

I_0 ——换算截面惯性矩；

I_n ——净截面惯性矩。

2.2.4 计算系数及其他

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

α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

β_c ——混凝土强度影响系数；

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

β_L ——局部受压时的混凝土强度提高系数；

γ ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数；

η ——偏心受压构件考虑二阶弯矩影响的轴向力偏心距增大系数；

λ ——计算截面的剪跨比；

μ ——摩擦系数；

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数；

ρ ——纵向受力钢筋的配筋率；

ρ_{sv} 、 ρ_{sh} ——竖向箍筋、水平箍筋或竖向分布钢筋、水平分布

钢筋的配筋率；

ρ_v ——间接钢筋或箍筋的体积配筋率；

φ ——轴心受压构件的稳定系数；

θ ——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数；

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数。

3 材 料

3.1 混凝土及预应力筋

3.1.1 预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜小于 C40 且不应小于 C30。

3.1.2 预应力混凝土结构的普通钢筋应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

3.1.3 根据结构受力特点、环境条件和施工方法的不同，预应力混凝土结构中预应力筋宜采用预应力钢绞线、钢丝，也可采用预应力螺纹钢筋。

在先张法预应力混凝土构件中，宜采用钢绞线和中等强度钢丝。在后张法预应力混凝土构件中宜采用高强度钢绞线。

有特殊防腐蚀要求时，可选用镀锌钢丝、镀锌钢绞线或环氧涂层钢绞线。无粘结预应力构件宜选用无粘结预应力钢绞线；在缓粘结预应力构件或结构中宜采用高强度钢绞线。

3.1.4 钢筋和预应力筋的强度标准值、设计值应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

3.1.5 预应力筋弹性模量 E_s 应按表 3.1.5 采用。

表 3.1.5 预应力筋弹性模量

种类	E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
中强度预应力钢丝、消除应力钢丝	2.05
预应力螺纹钢筋	2.0
钢绞线	1.95

注：必要时可采用实测的弹性模量。

3.1.6 预应力筋的疲劳应力幅限值 Δf_{py}^f 应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

3.1.7 预应力筋在最大力下的总伸长率 δ_{gt} 不应小于 3.5%。

3.1.8 预应力镀锌钢绞线应符合下列规定：

1 镀锌钢绞线适用于体外预应力结构，不应直接与混凝土、砂浆接触；

2 镀锌钢丝和镀锌钢绞线的规格和力学性能应符合现行国家标准《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》GB/T 17101、行业标准《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》YB/T 152 和《镀锌钢绞线》YB/T 5004 的有关规定。

3.1.9 填充型环氧涂层钢绞线的规格和力学性能指标应符合现行行业标准《环氧涂层预应力钢绞线》JG/T 387 的有关规定。

3.1.10 单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线的规格和力学性能指标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 的有关规定。

3.1.11 缓粘结预应力钢绞线应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 的有关规定；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。

3.1.12 无粘结预应力筋应符合现行行业标准《无粘结预应力钢绞线》JG/T 161 的有关规定。

3.2 预应力用锚具、夹具和连接器

3.2.1 高强度预应力筋锚具适用于低强度预应力筋和高强度预应力筋，低强度预应力筋锚具适用于低强度预应力筋。不同锚具单元不应混淆组装使用。

3.2.2 钢绞线长度小于 13m 或张拉力小于 $0.5f_{pk}$ 时，锚具损失值占比较大宜采用低回缩锚具。

3.2.3 预应力筋用锚具和连接器的性能除应符合规程规定外，尚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、行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 和《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的有关规定。

3.2.4 预应力筋—锚具组装件的静载锚固性能应由静载试验测定的锚具效率系数 η_a 和达到实测极限拉力时组装件受力长度的总应变 ϵ_{apu} 确定，尚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。

预应力筋—锚具组装件静载锚固性能试验用的预应力筋强度等级不宜大于该锚具适用的强度等级的 1.05 倍。

3.2.5 承受低应力或动荷载的夹片式锚具应具有防松脱性能。

3.2.6 缓粘结预应力钢绞线宜采用单孔锚具锚固。缓粘结预应力筋锚具的选用，应根据缓粘结预应力筋的种类、张拉力值及应用的环境类别选定。张拉端宜采用夹片锚具，埋入式固定端宜采用挤压锚具，缓粘结预应力筋所采用的锚具的静载锚固性能应符合下列规定：

$$\eta_a \geq 0.95 \quad (3.2.6-1)$$

$$\epsilon_{apu} \geq 2.0\% \quad (3.2.6-2)$$

式中： η_a ——预应力筋—锚具组装件静载试验测得的锚具效率系数；

ϵ_{apu} ——预应力筋—锚具组装件静载试验达到实测极限拉力时的总应变。

锚具效率系数可按下式计算：

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{F_{pm}} \quad (3.2.6-3)$$

式中： F_{apu} ——单根预应力筋—锚具组装件的实测极限拉力；

F_{pm} ——实测单根预应力筋破断荷载平均值。

3.2.7 当锚具使用环境温度小于 -50°C 时，锚具尚应符合低温锚固性能要求。

3.2.8 预应力钢绞线张拉端宜选用夹片锚具，内埋式固定端宜选用挤压锚具，钢丝束宜采用镦头锚具，高强钢筋宜采用螺母锚具。

3.3 成孔用管料

3.3.1 后张预应力混凝土梁类构件中预埋成孔管材宜采用圆形

金属波纹管，板类构件宜采用扁形金属波纹管；施工周期较长时成孔管材宜选用镀锌金属波纹管；曲率半径小、密封性和抗疲劳性要求较高的成孔管材宜采用塑料波纹管；竖向分段施工的成孔管材宜采用钢管。

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 的有关规定。

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

3.4 锚 垫 板

3.4.1 预应力筋用锚垫板或承压板应符合现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的有关规定。

3.4.2 锚具应布置在金属锚垫板或承压板上，不得直接放于构件混凝土表面。

3.4.3 锚垫板或承压板尺寸应根据锚固区配筋、混凝土强度等级及局部承压验算结果合理选用平板形、喇叭管状或连体锚板。

3.4.4 锚垫板或承压板上宜设置灌浆孔。

3.5 灌 浆 材 料

3.5.1 灌浆材料应符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448 的规定。

3.5.2 孔道灌浆用水泥应采用普通硅酸盐水泥，其质量应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定。各种原材料的氯离子含量应严格控制在水泥材料总量的 0.02% 以内。

3.5.3 孔道灌浆用外加剂的质量和使用时应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076、《混凝土外加剂应用技术规范》GB 50119 和《预应力孔道灌浆剂》GB/T 25182 的规定。

3.5.4 孔道灌浆用水泥和外加剂进场时应附有质量证明书，并作进场复验。对孔道灌浆较少的一般工程，当有可靠依据时，可

不做材料性能的进场复验。

3.6 缓粘结预应力筋

3.6.1 缓粘结预应力钢绞线质量要求应符合现行行业标准《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 的规定，布置在混凝土构件截面内部预应力筋应采用带横肋缓粘结预应力筋，体外预应力束可采用无横肋缓粘结预应力筋。制作缓粘结预应力筋的钢绞线应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的有关规定。

3.6.2 缓粘结预应力钢绞线应连续生产，每盘由一根钢绞线组成，不应有接头及死弯，盘放内径不宜小于 1.5m。

3.6.3 缓粘结预应力筋的强度标准值应具有不小于 95%的保证率。缓粘结预应力筋内钢绞线规格和力学性能指标应符合表 3.6.3 的规定。

表 3.6.3 缓粘结预应力筋内钢绞线规格和力学性能

缓粘结 预应力 筋种类	公称 直径 (mm)	公称 面积 (mm ²)	最大 外径 (mm)	缓粘结 材料 厚度 (mm)	极限强度 标准值 f_{ptk} (N/mm ²)	抗拉强度 设计值 f_{py} (N/mm ²)	抗压强度 设计值 f'_{py} (N/mm ²)	疲劳应力 幅限值 (N/mm ²)
1×7	15.2	140	19.0	1.0	1860 1960	1320 1390	390	100
	17.8	191	21.8	1.0	1860	1320		
	21.6	285	26.2	1.15~ 1.25	1860	1320		
1×19	21.8	313	26.4	1.15~ 1.25	1860	1320		
	28.6	532	33.2	1.15~ 1.25	1860	1320		

注：1 符合《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 标准的钢绞线都可制成缓粘结预应力筋，但在使用时必须重新测定相应力学性能和粘结锚固性能；
2 带肋缓粘结钢绞线的肋高一般为 1.2mm。

3.6.4 缓粘结剂初始粘度、固化后的拉伸剪切强度、弯曲强度、抗压强度，固化后耐久性等性能应符合现行国家行业标准《缓粘结预应力钢绞线专用粘合剂》JG/T 370 的有关规定。

3.6.5 缓粘结剂应沿预应力钢绞线全长连续充填且均匀饱满。常用缓粘结预应力筋内缓粘结材料涂量应符合表 3.6.5 的有关规定。

表 3.6.5 缓粘结预应力筋内缓粘结材料涂量

种类	缓粘结钢绞线公称直径 (mm)	无肋缓粘结钢绞线 (g/m)	带肋缓粘结钢绞线 (g/m)
1×7	15.2	≥190	≥230
	17.8	≥230	≥320
1×19	21.8	≥280	≥360
1×19	28.6	≥420	≥530

3.6.6 缓粘结剂应具有良好的化学稳定性，对周围其他材料无侵蚀作用。缓粘结剂的主要物理、力学性能指标应满足表 3.6.6-1 的要求，缓粘结剂的标准固化时间与标准张拉适用期的关系应按照表 3.6.6-2 采用。

表 3.6.6-1 缓粘结剂的主要物理力学性能

缓粘结剂密度 (g/cm³)	初始粘度 (mPa·s)	固化后抗压强度 (MPa)	固化后抗折强度 (MPa)
1.95±0.10	(1~10) ×10 ⁴	≥50	≥20

表 3.6.6-2 缓粘结剂的标准固化时间与标准张拉适用期关系

标准固化时间 (d)，容许误差 (d)	标准张拉适用期 (d)，容许误差 (d)
180，±30	60，±10
270，±30	90，±15
360，±30	120，±20
720，±30	240，±40

- 注：1 经材料供需双方同意，也可采用表 3.6.6-1 和表 3.6.6-2 所列以外的缓粘结剂制作缓粘结预应力钢绞线。
- 2 不同温度下固化时间和张拉适用期可以参考厂家产品说明书。

3.6.7 缓粘结预应力钢绞线外包护套参数应符合现行国家标准《聚乙烯（PE）树脂》GB/T 11115 的有关规定。

3.6.8 缓粘结预应力钢绞线外包护套应薄厚均匀，尺寸应满足表 3.6.8 的要求；带肋缓粘结预应力钢绞线表面应横肋分明，且应无气孔、无明显的裂纹和损伤。外包护套轻微损伤处可采用外包聚乙烯胶带或热熔胶棒进行修补。

表 3.6.8 常用缓粘结预应力筋的外包护套规格

缓粘结钢绞线公称直径 (mm)	极限强度 标准值 (MPa)	护套厚度 (mm)	护套肋宽	护套肋高 (mm)	护套肋 间距 l (mm)
15.2	1860	$1.0^{+0.4}_{-0.2}$	$(0.4 \sim 0.7)l$	≥ 1.2	10.0~16.0
	1960				

注：公称直径 15.20mm 钢绞线制成的缓粘结预应力钢绞线是后张预应力结构中最常用的型号。如有其他需要，根据供需双方协商，也可以生产和供应其他强度和直径的缓粘结预应力钢绞线。

4 结构设计

4.1 一般规定

4.1.1 预应力混凝土结构按承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算时，应按国家现行有关标准规定的作用（荷载）对结构的整体进行作用（荷载）效应分析，并应对施工阶段进行验算。

公路桥涵按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的有关规定进行设计。

4.1.2 荷载及其效应组合应按下列规定采用：

1 建筑结构的荷载应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定执行。

2 城市桥梁的荷载应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定执行，荷载组合及分项系数应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的规定执行。正常使用极限状态按短期效应（频遇）组合设计时，应采用频遇值作为可变作用的代表值；按准永久组合设计时，应采用准永久值作为可变作用的代表值。

4.1.3 预应力混凝土结构的作用效应分析可按下列规定执行：

1 预应力效应的分析应考虑施工程序、时间效应和空间效应等因素的影响，超长结构应进行主体结构施工全过程力学分析。

2 存在多重约束的结构体系应考虑施加预应力对整体结构的影响，预应力构件和非预应力构件均应考虑预应力作用的影响。

4.1.4 预应力筋的布置应遵循下列原则：

1 宜参照弯矩图布置预应力筋。

2 控制截面处的预应力筋宜靠近混凝土构件受拉边缘布置。

3 预应力筋宜连续布置。

4 综合考虑保护层厚度、防火要求、次内力和构造要求等因素。

4.1.5 预应力混凝土结构的次内力分析时宜采用约束次内力法。承载能力极限状态计算时，可采用考虑塑性内力重分布的分析方法。

4.1.6 预应力混凝土结构设计应计入预应力作用效应；超静定结构的次内力应参与组合计算。

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

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，构件重要性系数 γ_0 应取 1.0；当预应力作用效应对承载力不利时，构件重要性系数 γ_0 在持久设计状况和短暂设计状况下，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 预应力混凝土结构可采用荷载平衡法进行初步设计。

4.1.8 当预应力混凝土结构节点钢筋密集，采用群锚布置困难时，宜采用缓粘结预应力混凝土结构。

4.1.9 缓粘结预应力混凝土结构粘结前的施工阶段验算应按无粘结预应力混凝土结构计算；粘结后应按照有粘结预应力混凝土结构进行正常使用极限状态验算和承载能力极限状态验算。

4.1.10 预应力混凝土结构及结构加固改造采用体外预应力时，体外预应力混凝土结构构件应符合本规程附录 A 的规定。

4.1.11 在大跨度预应力混凝土梁设计中，宜采用预应力型钢混凝土或预应力钢与混凝土组合结构构件。预应力型钢混凝土构件应符合本规程附录 B 的规定，预应力钢与混凝土组合结构构件应符合本规程附录 C 的规定。

4.1.12 预应力混凝土结构耐久性设计和疲劳验算应符合现行国

家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

4.2 结构内力分析

4.2.1 结构应按各种可能的最不利作用的组合进行总体分析。组合应包括预加力作用、温度作用、收缩徐变作用、约束作用和基础不均匀沉降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。

预应力混凝土结构构件，除应根据使用条件进行承载力计算及变形、抗裂、裂缝宽度和应力验算外，尚应按具体情况对制作、运输及安装等阶段进行验算。

4.2.2 正常使用极限状态内力分析应符合下列规定：

1 在确定内力与变形时按弹性理论值分析。由预应力引起的内力和变形可采用约束次内力法计算。次剪力宜根据结构构件各截面次弯矩分布按结构力学方法计算。次轴力宜按结构力学方法计算。

2 预应力混凝土主梁与次梁相交时，主梁次内力计算宜考虑次梁分割主梁产生的空间效应。

3 构件截面或板单元宽度的几何特征可按毛截面（不计钢筋）计算。

4.2.3 施工阶段及正常使用极限状态的验算，应将预加力作为荷载计算其效应。承载能力极限状态计算（疲劳验算除外）时，应将预应力筋的强度限值作为结构抗力的一部分。

4.2.4 承载能力极限状态的内力与变形分析可采用弹性理论分析法。

4.2.5 大跨度空间拱结构中预应力混凝土基础拉梁应作为受拉构件进行内力分析。

4.2.6 置于地下的预应力混凝土基础拉梁，内力分析时需考虑构件土体摩擦对预应力损失的影响；当基础拉梁位于土体表层深度较浅处，或周围覆盖细砂、油毛毡等减阻材料时，可不考虑土体摩擦影响。

4.3 施工阶段验算

4.3.1 施工阶段验算时，应考虑预加力、构件自重及施工荷载等影响。预制构件在吊装、运输时，构件自重应乘以动力系数，并应符合下列规定：

1 建筑工程预应力混凝土构件吊装、运输时，动力系数可取 1.5；构件翻转及安装过程中就位、临时固定时，动力系数可取 1.2。当有可靠经验时，动力系数可根据实际受力情况和安全要求适当增减。

2 桥梁工程预应力混凝土构件在吊装、运输时，动力系数可取 1.2 或 0.85，并可视构件具体情况作适当增减。

4.3.2 对分批施加载荷和分批张拉的预应力混凝土转换梁等构件，应根据不同的荷载工况和张拉阶段分别进行施工验算。

4.3.3 进行施工阶段验算时，预应力混凝土结构构件截面边缘的混凝土法向应力限值不应大于表 4.3.3 的规定。

表 4.3.3 施工阶段的应力限值

项目			城市轨道 交通及铁 路桥梁	城市道路 及公路 桥梁	建筑结构、 圆形水池
					允许出现拉 应力的构件
施工阶段计入 梁自重后	混凝土 压应力	C50 ~ C60	$0.75 f'_{ck}$	$0.75 f'_{ck}$	$0.8 f'_{ck}$
		C30 ~ C45	$0.70 f'_{ck}$	$0.70 f'_{ck}$	
		超张拉时	$0.80 f'_{ck}$	—	
	混凝土拉应力		$0.70 f'_{tk}$	$0.70 f'_{tk}$	$1.0 f'_{tk}$
	预拉区配置非预应力 筋的混凝土拉应力		—	$1.15 f'_{tk}$	—
运输及安 装阶段	混凝土最大压应力		$0.8 f'_{ck}$	—	—
	混凝土最大拉应力		$0.8 f'_{tk}$		
架桥机吊梁通过时的最大拉应力			$1.0 f'_{tk}$		

注：1 施工阶段预拉区允许出现拉应力的构件，预拉区纵向配筋率 $(A'_s + A'_p) / A$ 不应小于 0.15%，对后张法构件不应计入 A'_p ；
2 建筑结构简支构件的端部区段截面预拉区边缘纤维的混凝土拉应力允许大于 f'_{tk} ，但不应大于 $1.2 f'_{tk}$ ；
3 传力锚固时预应力筋的应力不大于 $0.65 f_{ptk}$ 。

4.3.4 构件截面边缘的混凝土法向应力可按下列公式计算：

$$\sigma_{cc} \text{ 或 } \sigma_{ct} = \sigma_{pc} + \frac{N_k}{A_0} \pm \frac{M_k}{W_0} \quad (4.3.4)$$

式中： σ_{ct} ——相应施工阶段计算截面预拉区边缘纤维的混凝土拉应力；

σ_{cc} ——相应施工阶段计算截面预拉区边缘纤维的混凝土压应力；

σ_{pc} ——由预加力在截面边缘纤维产生的混凝土法向应力；

N_k 、 M_k ——构件自重及施工荷载的标准组合在计算截面产生的轴向力标准值、弯矩标准值；

W_0 ——构件截面边缘的换算截面弹性抵抗矩。

注：公式（4.3.4）中，当 σ_{pc} 为压应力时取正值，当 σ_{pc} 为拉应力时取负值；当 N_k 为轴向拉力时取负值；当 M_k 产生的边缘纤维应力为压应力时式中符号取正值，拉应力时式中符号取负值。

4.4 建筑及桥梁结构设计

4.4.1 跨度大于 12m 的框架梁、跨度大于 6m 的单向板和双向板、跨度大于 15m 的井字梁楼盖宜采用预应力混凝土结构。

4.4.2 预应力混凝土板的厚度及梁的截面高度选择，应符合下列规定。

1 预应力板的厚度应符合表 4.4.2-1 的规定。

表 4.4.2-1 预应力板的厚度与跨度的比值 (h/l)

项次	板的支承情况	板的种类				
		单向板	双向板	悬挑板	无梁楼盖	
					有柱帽或托板	无柱帽
1	简支	1/35~1/40	1/40~1/45	—	1/45~	1/35~
2	连续	1/40~1/45	1/45~1/50	1/10	1/50	1/40

- 注：1 l 为板的短边计算跨度；无梁楼盖中 l 为板的长边计算跨度；
- 2 双向板指板的长边与短边之比小于 3 的情况；
- 3 荷载较大时，板厚应适当增加；
- 4 考虑预应力筋的布置及效应，板厚不宜小于 150mm。

2 预应力梁的截面高度宜符合表 4.4.2-2 的规定。

表 4.4.2-2 预应力梁的截面高度与跨度的比值 (h/l)

分类	梁截面高跨比
简支梁	1/15~1/20
连续梁	1/20~1/25
单向密肋梁	1/20~1/25
双向井字梁	1/20~1/25
三向井字梁	1/25~1/30
悬挑梁	1/8~1/10
框架梁	1/15~1/20
简支扁梁	1/15~1/25
连续扁梁	1/20~1/30
框架扁梁	1/18~1/30

注：1 表中 l 为短跨计算跨度；

2 双向密肋梁的截面高度可适当减小；

3 梁的荷载较大时，截面高度取较大值，预应力度较大时，可以取较小值；

4 有特殊要求的梁，截面高度尚可较表列数值减小，但应验算刚度，并采取增强刚度的措施，如增加梁宽，增设受压钢筋等。

4.4.3 桥梁结构设计时，梁截面高度可按下列高跨比确定：

1 公路与城市道路、城市轨道交通后张预应力混凝土简支梁的梁截面高度可取跨度的 $1/15 \sim 1/20$ ，先张法空心板（梁）的梁截面高度可取跨度的 $1/20 \sim 1/25$ 。

2 变截面连续箱梁的主梁截面高度，支点处截面高度可取跨度的 $1/16 \sim 1/25$ ，跨中截面高度可取跨度的 $1/40 \sim 1/50$ 。

3 采用悬臂浇筑法施工连续梁，支点处截面高度可取跨度的 $1/18 \sim 1/20$ 。

5 预应力损失值计算

5.1 一般规定

5.1.1 预应力筋中的预应力损失值按表 5.1.1 的规定计算。

表 5.1.1 预应力损失值 (N/mm²)

引起损失的因素		符号	先张法构件	后张法构件
张拉端锚具变形和钢筋内缩		σ_{11}	按本规程第 5.2.1 条的规定计算	按本规程第 5.2.1 条和第 5.2.2 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 5.2.3 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 5.2.3 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 5.2.4 条的规定计算	
混凝土的收缩和徐变		σ_{15}	按本规程第 5.2.5 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

注：式中 Δ_t 为混凝土加热养护时，受张拉的预应力筋与承受拉力的设备之间的温差 (0℃)。

5.1.2 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/mm²；

2 后张法构件 80N/mm^2 。

5.1.3 预应力构件在各阶段的预应力损失值宜按表 5.1.3 的规定进行组合。

表 5.1.3 各阶段预应力损失值的组合

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_1^I	$\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{14}$	$\sigma_{11} + \sigma_{12}$
混凝土预压后（第二批）损失 σ_1^{II}	σ_{15}	$\sigma_{14} + \sigma_{15} + \sigma_{16}$

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。

5.2 预应力损失值计算

5.2.1 预应力直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_{11} 可按下列公式计算：

$$\sigma_{11} = \frac{a}{l} E_s \quad (5.2.1)$$

式中： a ——张拉端锚具变形和钢筋内缩值（mm），可按表 5.2.1 采用；

l ——张拉端至锚固端之间的距离（mm）。

表 5.2.1 锚具变形和钢筋内缩值 a （mm）

锚具类别		a
支承式锚具（钢丝束墩头锚具等）	螺母缝隙	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：表中的锚具变形和钢筋内缩值也可根据实测数据确定；其他类型的锚具变形和钢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。

5.2.2 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钢筋内缩值的条件确定，反向摩擦系数可按本规程表 5.2.3-1 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(图 5.2.2-1)。当其对应的圆心角 $\theta \leq 45^\circ$ 时，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：

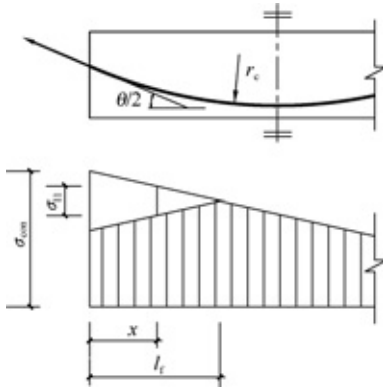


图 5.2.2-1 圆弧形曲线预应力筋的预应力损失 σ_{l1}

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_{con} l_f \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right) \left(1 - \frac{x}{l_f} \right) \quad (5.2.2-1)$$

反向摩擦影响长度 l_f (m) 可按下列公式计算：

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_s}{1000\sigma_{con}(\mu/r_c + \kappa)}} \quad (5.2.2-2)$$

式中： r_c ——圆弧形曲线预应力筋的曲率半径 (m)；

x ——张拉端至计算截面的距离 (m)；

a ——张拉端锚具变形和钢筋内缩值 (mm)，按表 5.2.1 采用；

E ——预应力筋弹性模量。

2 端部直线和两条圆弧形曲线组成的预应力筋 (图 5.2.2-2), 在反向摩擦影响长度 l_f 范围内的预应力损失值 σ_{ll} 可按下列公式计算:

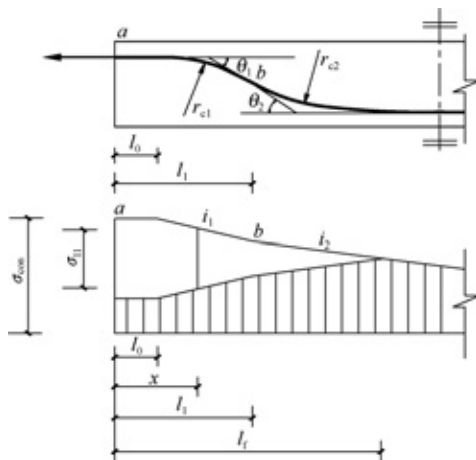


图 5.2.2-2 两条圆弧形曲线组成的预应力筋的预应力损失 σ_{ll}

当 $x \leq l_0$ 时

$$\sigma_{ll} = 2i_1 (l_1 - l_0) + 2i_2 (l_f - l_1) \quad (5.2.2-3)$$

当 $l_0 < x \leq l_1$ 时

$$\sigma_{ll} = 2i_1 (l_1 - x) + 2i_2 (l_f - l_1) \quad (5.2.2-4)$$

当 $l_1 < x \leq l_f$ 时

$$\sigma_{ll} = 2i_2 (l_f - x) \quad (5.2.2-5)$$

反向摩擦影响长度 l_f (m) 可按下列公式计算:

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_s}{1000i_2} - \frac{i_1(l_1^2 - l_0^2)}{i_2}} + l_1^2 \quad (5.2.2-6)$$

$$i_1 = \sigma_a (k + \mu/r_{c1}) \quad (5.2.2-7)$$

$$i_2 = \sigma_b (k + \mu/r_{c2}) \quad (5.2.2-8)$$

式中: l_1 ——预应力筋张拉端起点至反弯点的水平投影长度;

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；

σ_a 、 σ_b ——预应力筋在 a 、 b 点的应力。

3 当折线形预应力筋的锚固损失消失于折点 c 之外时 (图 5.2.2-3)，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：

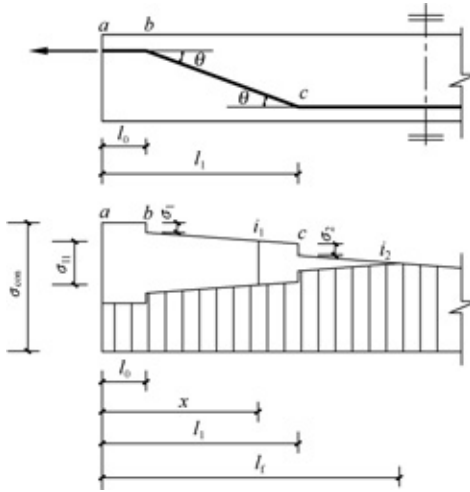


图 5.2.2-3 折线形预应力筋的预应力损失 σ_{l1}

当 $x \leq l_0$ 时

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_1 + 2i_1 (l_1 - l_0) + 2\sigma_2 + 2i_2 (l_f - l_1) \quad (5.2.2-9)$$

当 $l_0 < x \leq l_1$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_1 (l_1 - x) + 2\sigma_2 + 2i_2 (l_f - l_1) \quad (5.2.2-10)$$

当 $l_1 < x \leq l_f$ 时

$$\sigma_{l1} = 2i_2 (l_f - x) \quad (5.2.2-11)$$

反向摩擦影响长度 l_f (m) 可按下列公式计算：

$$l_1 = \sqrt{\frac{aE_s}{1000i_2} - \frac{i_1(l_1 - l_0)^2 + 2i_1l_0(l_1 - l_0) + 2\sigma_2l_1}{i_2}} + l_1^2 \quad (5.2.2-12)$$

$$i_1 = \sigma_{\text{con}} (1 - \mu\theta) k \quad (5.2.2-13)$$

$$i_2 = \sigma_{\text{con}} [1 - k(l_1 - l_0)] (1 - \mu\theta)^2 k \quad (5.2.2-14)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{con}} \mu\theta \quad (5.2.2-15)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{\text{con}} [1 - k(l_1 - l_0)] (1 - \mu\theta) \mu\theta \quad (5.2.2-16)$$

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 ——张拉起点至预应力筋折点 c 的水平投影长度。

5.2.3 预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失值 σ_{l_2}
(图 5.2.3) 宜按下列公式计算：

$$\sigma_{l_2} = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{1}{e^{\kappa x + \mu\theta}} \right) \quad (5.2.3-1)$$

当 $(\kappa x + \mu\theta) \leq 0.2$ 时， σ_{l_2} 可按下式近似计算：

$$\sigma_{l_2} = \sigma_{\text{con}} (\kappa x + \mu\theta) \quad (5.2.3-2)$$

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

θ ——张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角 (rad)；

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数，可按表 5.2.3-1 采用；

μ ——预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数，可按表 5.2.3-1 采用。

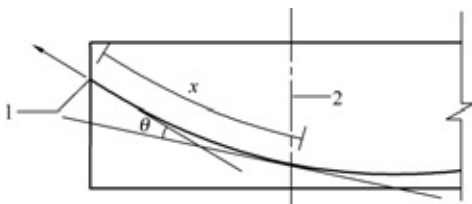


图 5.2.3 预应力摩擦损失计算

1—张拉端；2—计算截面

表 5.2.3-1 摩擦系数

孔道成型方式	κ	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
缓粘结预应力筋	0.006	0.12	—
无粘结预应力筋	0.004	0.09	—

- 注：1 表中系数也可根据实测数据确定；
2 无粘结预应力钢绞线的数据适用于由公称直径 9.5mm、12.70mm、15.2mm 或 15.70mm 钢绞线制成的无粘结预应力筋。

缓粘结预应力筋的摩擦系数也可根据实测数据确定，或由厂家提供。

一般情况下，体外预应力束在转向装置处的摩擦损失值 σ_{12} 宜按下列公式计算：

$$\sigma_{12} = \mu \theta \sigma_{\text{con}} \tag{5.2.3-3}$$

式中： θ ——体外束在转向块处的弯折转角（rad）；
 μ ——体外束在转向块处的摩擦系数，可按表 5.2.3-2 采用。

表 5.2.3-2 转向块处的摩擦系数

钢绞线	μ
镀锌钢管	0.20~0.25
HDPE 塑料管	0.15~0.20
无粘结预应力筋	0.08~0.12

当体外束与转向块鞍座处接触长度不可忽略时，预应力损失值 σ_{12} 应根据实际情况采用式（5.2.3-1）或式（5.2.3-2）计算得出。

5.2.4 预应力筋应力松弛引起的预应力损失 σ_{14} 应按下列规定

计算:

1 消除应力钢丝、钢绞线

1) 普通松弛:

$$\sigma_{l4} = 0.4\psi\left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5\right)\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.4-1)$$

此处, 一次张拉时, $\psi=1.0$; 采用超张拉时, $\psi=0.9$ 。

2) 低松弛:

当 $\sigma_{\text{con}} \leq 0.5f_{\text{ptk}}$ 时, 取 $\sigma_{l4} = 0$;

$$\text{当 } \sigma_{\text{con}} \leq 0.7f_{\text{ptk}} \text{ 时, } \sigma_{l4} = 0.125\left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5\right)\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.4-2)$$

$$\text{当 } 0.7f_{\text{ptk}} < \sigma_{\text{con}} \leq 0.8f_{\text{ptk}} \text{ 时, } \sigma_{l4} = 0.2\left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.575\right)\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.4-3)$$

2 预应力螺纹钢筋

$$\sigma_{l4} = 0.03\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.4-4)$$

3 中强度预应力钢丝

$$\sigma_{l4} = 0.08\sigma_{\text{con}} \quad (5.2.4-5)$$

4 桥梁中预应力筋的应力松弛值应根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 第 6.2.6 条的规定计算。

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

1 对一般建筑结构构件

1) 先张法构件

$$\sigma_{l5} = \frac{45 + 280 \frac{\sigma_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho} \quad (5.2.5-1)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{45 + 280 \frac{\sigma'_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho'} \quad (5.2.5-2)$$

2) 后张法构件

$$\sigma_{l5} = \frac{35 + 280 \frac{\sigma_{pc}}{f_{cu}}}{1 + 15\rho} \quad (5.2.5-3)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{35 + 280 \frac{\sigma'_{pc}}{f_{cu}}}{1 + 15\rho'} \quad (5.2.5-4)$$

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

f'_{cu} ——施加预应力时的混凝土立方体抗压强度；

ρ 、 ρ' ——受拉区、受压区预应力筋和普通钢筋的配筋率。对先张法构件， $\rho = (A_p + A_s)/A_0$ ， $\rho' = (A'_p + A'_s)/A_0$ ；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，式（5.2.5-2）、式（5.2.5-4）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小于40%的环境下时， 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 附录 K 进行计算。

3 桥梁工程预应力筋的混凝土收缩和徐变引起的预应力筋应力损失值 σ_{l5} 应根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 第 6.2.7 条的规定计算。

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

5.2.6 城市道路桥梁预应力筋与台座之间温差引起的预应力损失 σ_{l3} 可按下式计算：

$$\sigma_{l3} = 2 (t_2 - t_1) \quad (5.2.6)$$

式中： t_2 ——混凝土加热养护时，受拉钢筋的最高温度（℃）；

t_1 ——张拉钢筋时，制造场地的温度（℃）。

注：为减少温差引起的预应力损失，可采用分阶段的养护措施。

6 承载力极限状态计算

6.1 正截面受弯承载力计算

6.1.1 预应力混凝土构件正截面承载力极限状态计算应考虑约束（次内力）对预应力效应的影响。

6.1.2 预应力混凝土结构正截面承载力计算的基本假定及截面计算简图应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

6.1.3 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应符合下列规定（图 6.1.3）：

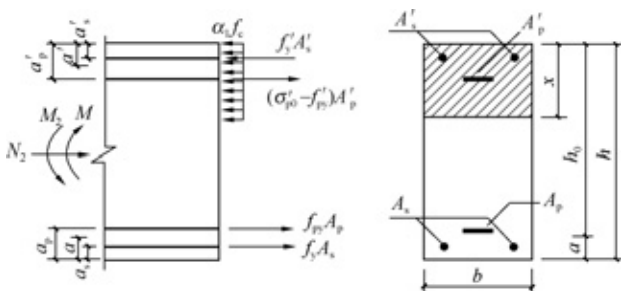


图 6.1.3 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算

$$M - \left[M_2 - N_2 \left(\frac{h}{2} - a \right) \right] \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (6.1.3-1)$$

混凝土受压区高度应按下列公式确定：

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s - f'_y A'_s + f_{py} A_p + (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p + N_2 \quad (6.1.3-2)$$

混凝土受压区高度尚应符合下列条件：

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (6.1.3-3)$$

$$x \geq 2a' \quad (6.1.3-4)$$

式中： M ——外荷载组合值；

M_2 、 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弯矩、次轴力设计值，先张法预应力混凝土结构中 $M_2=0$ ， $N_2=0$ ；

α_1 ——系数，当混凝土强度等级不大于 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；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向普通钢筋的截面面积；

A_p 、 A'_p ——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积；

σ'_{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；

b ——矩形截面的宽度或倒 T 形截面的腹板宽度；

h_0 ——截面有效高度；

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；

a 、 a' ——受拉区、受压区全部纵向钢筋合力点至截面受拉区受压边缘的距离，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 ($\sigma'_{p0} - f'_{py}$) 为拉应力时，公式 (6.1.3-4) 中的 a' 用 a'_s 代替。

6.1.4 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面受弯构件 (图 6.1.4)，其正截面受弯承载力应符合下列规定：

1 当满足下列条件时，应按宽度为 b'_f 的矩形截面计算：

$$f_y A_s + f_{py} A_p \leq \alpha_1 f_c b'_f h'_f + f'_y A'_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p - N_2 \quad (6.1.4-1)$$

2 当不满足公式 (6.1.4-1) 的条件时，混凝土受压区高度应按下列公式计算：

$$M - \left[M_2 - N_2 \left(\frac{h}{2} - a \right) \right] \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s)$$

$$-(\sigma'_{p0} - f'_{py})A'_p(h_0 - a'_p) \quad (6.1.4-2)$$

$$\alpha_1 f_c [bx + (b'_f - b)h'_f] = f_y A_s - f'_y A'_s + f_{py} A_p + (\sigma'_{p0} - f'_{py})A'_p + N_2 \quad (6.1.4-3)$$

式中： h'_f ——T形、I形截面受压区翼缘高度；

b'_f ——T形、I形截面受压区的翼缘计算宽度。

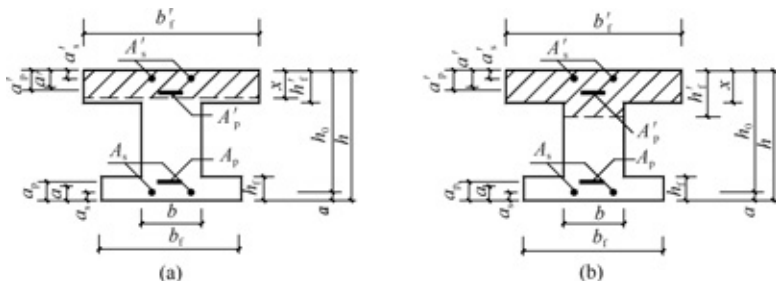


图 6.1.4 I形截面受弯构件受压区高度位置

(a) $x \leq h'_f$; (b) $x > h'_f$

按上述公式计算 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 (6.1.3-3) 和公式 (6.1.3-4) 的要求。

6.1.5 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 (6.1.3-2) 或公式 (6.1.4-3) 计算的混凝土受压区高度 x 时，可仅考虑计入受弯承载力条件所需的纵向受拉钢筋截面面积。

6.1.6 当计算中计入纵向普通受压钢筋时，应满足本规程公式 (6.1.3-4) 的条件；当不满足时，正截面受弯承载力应符合下列规定：

$$M - \left[M_2 + N_2 \left(\frac{h}{2} - a'_s \right) \right] \leq f_{py} A_p (h - a_p - a'_s) + f_y A_s (h - a_s - a'_s) + (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (a'_p - a'_s) \quad (6.1.6)$$

式中： 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。

6.1.7 当采用无粘结预应力受弯构件时，第 6.1.3、6.1.4、6.1.6 条的 f_{py} 应改为无粘结预应力筋的应力设计值 σ_{pu} ， σ_{pu} 宜按下列公式计算：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + \Delta\sigma_p \quad (6.1.7-1)$$

$$\Delta\sigma_p = (240 - 335\xi_p) \left(0.45 + 5.5 \frac{h}{l_0} \right) \frac{l_2}{l_1} \quad (6.1.7-2)$$

$$\xi_p = \frac{\sigma_{pe} A_p + f_y A_s}{f_c b h_p} \quad (6.1.7-3)$$

此时，应力设计值 σ_{pu} 尚应符合下列条件：

$$\sigma_{pe} \leq \sigma_{pu} \leq f_{py} \quad (6.1.7-4)$$

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；

$\Delta\sigma_p$ ——无粘结预应力筋中的应力增量；

ξ_p ——综合配筋指标，不宜大于 0.4；

l_0 ——受弯构件计算跨度；

h ——受弯构件截面高度；

h_p ——无粘结预应力筋合力点至截面受压边缘的距离。

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：

$$\xi_p = \frac{\sigma_{pe} A_p + f_y A_s - f_c (b'_f - b) h'_f}{f_c b h_p} \quad (6.1.7-5)$$

式中， h'_f 为 T 形、I 形截面受压区的翼缘高度； b'_f 为 T 形、I 形截面受压区的翼缘计算宽度。

6.2 正截面受拉承载力计算

6.2.1 轴心受拉构件的正截面受拉承载力应符合下列规定：

$$N - N_2 \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (6.2.1)$$

式中： N ——轴向拉力设计值；

N_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生

的次轴力设计值；

A_s 、 A_p ——纵向普通钢筋、预应力筋的截面面积。

6.2.2 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 6.2.2 (a)）：

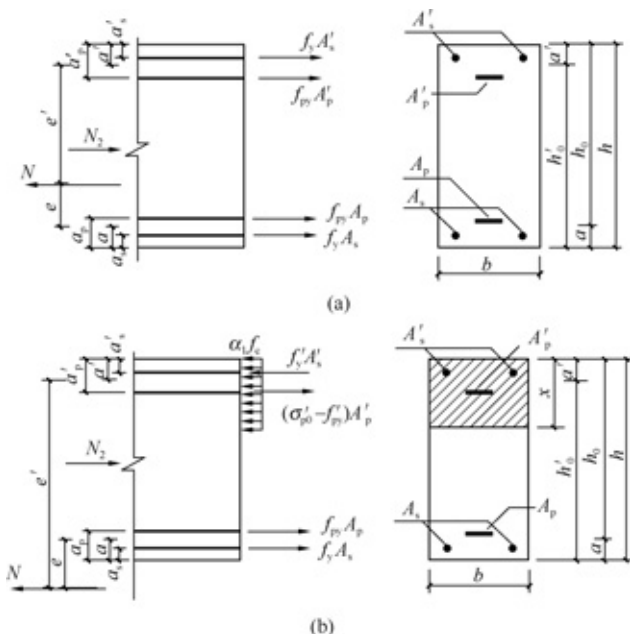


图 6.2.2 矩形截面偏心受拉构件正截面受拉承载力计算

(a) 小偏心受拉构件；(b) 大偏心受拉构件

$$Ne - N_2 \left(\frac{h}{2} - a \right) \leq f_y A'_s (h_0 - a'_s) + f_{py} A'_p (h_0 - a'_p) \quad (6.2.2-1)$$

$$Ne' - N_2 \left(\frac{h}{2} - a' \right) \leq f_y A_s (h'_0 - a_s) + f_{py} A_p (h'_0 - a_p) \quad (6.2.2-2)$$

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 6.2.2 (b)):

$$N - N_2 \leq f_y A_s + f_{py} A_p - f'_y A'_s + (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p - \alpha_1 f_c b x \quad (6.2.2-3)$$

$$N_e + N_2 \left(\frac{h}{2} - a \right) \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (6.2.2-4)$$

此时, 混凝土受压区的高度应满足式 (6.1.3-3) 的要求。当计算中计入纵向普通受压钢筋时, 尚应满足式 (6.1.3-4) 的条件; 当不满足时, 可按式 (6.2.2-2) 计算。

3 对称配筋的矩形截面偏心受拉构件, 无论大、小偏心受拉情况, 均可按式 (6.2.2-2) 计算。

6.3 正截面受压承载力计算

6.3.1 钢筋混凝土轴心受压构件正截面受压承载力应符合下列规定:

$$N - N_2 \leq 0.9\varphi (f_c A + f'_y A'_s) \quad (6.3.1)$$

式中: N ——轴向压力设计值;

N_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次轴力设计值, 以拉力为正方向;

φ ——钢筋混凝土构件的稳定系数, 按表 6.3.1 采用;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值;

A ——构件截面面积;

A'_s ——全部纵向钢筋的截面面积。

当纵向钢筋配筋率大于 3% 时, 公式 (6.3.1) 中的 A 应改用 $(A - A'_s)$ 代替。

表 6.3.1 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	132	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。

6.3.2 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力应符合下列规定（图 6.3.2）：

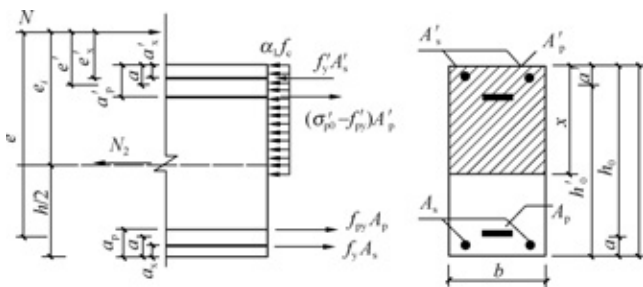


图 6.3.2 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力计算

$$N - N_2 \leq \alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s - \sigma_s A_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p - \sigma_p A_p \quad (6.3.2-1)$$

$$N_e - N_2 \left(\frac{h}{2} - a \right) \leq \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \quad (6.3.2-2)$$

$$e = e_i + h/2 - a \quad (6.3.2-3)$$

$$e_i = e_0 + e_a \quad (6.3.2-4)$$

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；

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；

e_i ——初始偏心距；

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；

e_0 ——轴向压力对截面重心的偏心距： $e_0 = M/N$ ；当需要考虑二阶效应时，按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用；

e_a ——附加偏心距，按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定采用。

在按上述规定计算时，尚应符合下列规定：

1 钢筋的应力 σ_s 、 σ_p 可按下列情况计算：

1) 当 $\xi \leq \xi_b$ 时，为大偏心受压构件，取 $\sigma_s = f_y$ 及 $\sigma_p = f_{py}$ 。此处， ξ 为相对受压区高度， $\xi = x/h_0$ 。

2) 当 $\xi > \xi_b$ 时，为小偏心受压构件， σ_s 、 σ_p 应按《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定进行计算。

2 当计入纵向普通受压钢筋时，受压区高度应满足本规程公式 (6.1.3-4) 的条件；当不满足时，其正截面受压承载力可按本规程第 6.1.6 条的规定进行计算，此时，应将公式 (6.1.6) 中的 M 以 Ne'_s 代替， 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；初始偏心距应按公式 (6.3.2-4) 确定。

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

$$Ne' - N_2 \left(\frac{h}{2} - a' \right) \leq f_c b h \left(h'_0 - \frac{h}{2} \right) + f'_y A_s (h'_0 - a_s) - (\sigma_{p0} - f'_{py}) A_p (h'_0 - a_p) \quad (6.3.2-5)$$

$$e' = \frac{h}{2} - a' - (e_0 - e_a) \quad (6.3.2-6)$$

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距离；

h'_0 ——纵向受压钢筋合力点至截面远边的距离。

6.4 斜截面承载力计算

6.4.1 矩形、T形和I形截面的预应力混凝土受弯构件，其受剪截面应符合下列条件：

当 $h_w/b \leq 4$ 时

$$V \leq 0.25\beta_c f_c b h_0 \quad (6.4.1-1)$$

当 $h_w/b \geq 6$ 时

$$V \leq 0.2\beta_c f_c b h_0 \quad (6.4.1-2)$$

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，包括预应力次剪力设计值 V_2 ；当参与组合的次剪力对结构不利时，预应力分项系数应取 1.2，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大于 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；

b ——矩形截面的宽度，T形截面或I形截面的腹板宽度；

h_0 ——截面的有效高度；

h_w ——截面的腹板高度：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。

注：1 对T形或I形截面的简支受弯构件，当有实践经验时，公式(6.4.1-1)中的系数可改用 0.3；

2 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。

6.4.2 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按下列规定采用：

1 支座边缘处的截面（图 6.4.2（a）、（b）截面 1-1）。

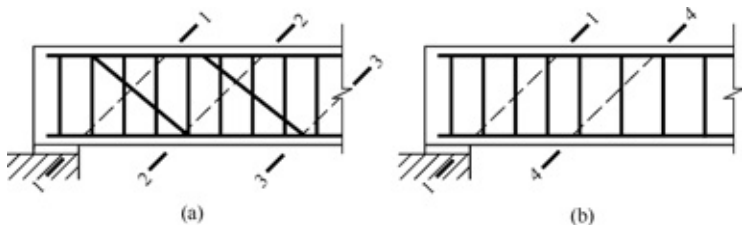


图 6.4.2 斜截面受剪承载力剪力设计值的计算截面

（a）弯起钢筋；（b）箍筋

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

2 受拉区弯起钢筋弯起点处的截面（图 6.4.2a 截面 2-2、3-3）。

3 箍筋截面面积或间距改变处的截面（图 6.4.2b 截面 4-4）。

4 腹板宽度改变处的截面。

注：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。

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

$$V - V_2 \leq V_{cs} + V_p \quad (6.4.3-1)$$

$$V_{cs} = \alpha_{cv} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (6.4.3-2)$$

$$V_p = 0.05 N_{p0} \quad (6.4.3-3)$$

式中：V——构件斜截面上的最大剪力设计值；

V_2 ——次剪力，次剪力方向向下为正（使构件顺时针转动）；

V_{cs} ——构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值；

V_p ——由预加力所提高的构件受剪承载力设计值；

α_{cv} ——斜截面混凝土受剪承载力系数：对于一般受弯构件取 0.7；对集中荷载作用下（包括作用有多种荷载，

其中集中荷载对支座截面或节点边缘所产生的剪力值占总剪力的 75% 以上的情况) 的独立梁, 取 α_{cv} 为 $\frac{1.75}{\lambda+1}$, λ 为计算截面的剪跨比, 可取 λ 等于 a/h_0 , 当 λ 小于 1.5 时, 取 1.5, 当 λ 大于 3 时, 取 3, a 取集中荷载作用点至支座截面或节点边缘的距离;

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积: $A_{sv} = nA_{sv1}$, 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;

f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值;

N_{p0} ——计算截面上混凝土法向预应力等于零时的预加力, 当 $N_{p0} > 0.3f_cA_0$ 时, 取 $N_{p0} = 0.3f_cA_0$, 此处, A_0 为构件的换算截面面积。

注: 1 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 $V_p = 0$ 。

2 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。

6.4.4 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列规定:

$$V - V_2 \leq V_{cs} + V_p + 0.8f_yA_{sb}\sin\alpha_s + 0.8f_{py}A_{pb}\sin\alpha_p \quad (6.4.4)$$

式中: V ——配置弯起钢筋处的剪力设计值, 按本规程第 6.4.5 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, 按本规程公式 (6.4.3-3) 计算, 但计算合力 N_{p0} 时可不考虑预应力弯起钢筋的作用;

A_{sb} 、 A_{pb} ——同一弯起平面内的非预应力弯起钢筋、预应力弯起

钢筋的截面面积；

α_s 、 α_p ——斜截面上非预应力弯起钢筋、预应力弯起钢筋的切线与构件纵向轴线的夹角。

6.4.5 计算弯起钢筋时，其剪力设计值可按下列规定取用(图 6.4.2a)：

1 计算第一排(对支座而言)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，取前一排(对支座而言)弯起钢筋弯起点处的剪力值。

6.4.6 矩形、T形和I形截面的预应力受弯构件，当满足下式要求时，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：

$$V \leq \alpha_{cv} f_t b h_0 + 0.05 N_{p0} \quad (6.4.6)$$

式中： α_{cv} ——截面混凝土受剪承载力系数，按本规程第 6.4.3 条的规定采用。

6.4.7 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规定(图 6.4.7)：

$$V - V_2 \leq V_{cs} + V_{sp} + 0.8 f_y A_{sb} \sin \alpha_s \quad (6.4.7-1)$$

$$V_{sp} = \frac{M - 0.8 (\sum f_{yv} A_{sv} z_{sv} + \sum f_y A_{sb} z_{sb})}{z + c \tan \beta} \tan \beta \quad (6.4.7-2)$$

式中： V ——构件斜截面上的最大剪力设计值；

M ——构件斜截面受压区末端的弯矩设计值；

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，按本规程公式(6.4.3-2)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钢筋合力的设计值在垂直方向的投影，其值不应大于 $(f_{py} A_p + f_y A_s) \sin \beta$ ，且不应小于 $\sigma_{pe} A_p \sin \beta$ ；

z_{sv} ——同一截面内箍筋的合力至斜截面受压区合力点的

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；

β ——斜截面受拉区始端处倾斜的纵向受拉钢筋的倾角；

c ——斜截面的水平投影长度,可近似取 $c=h_0$ 。

图 6.4.7 受拉边倾斜的受弯构件斜截面受剪承载力计算

6.4.8 受弯构件斜截面的受弯承载力应符合下列规定 (图 6.4.8):

$$M \leqslant (f_y A_s + f_{py} A_p) z + \sum f_y A_{sb} z_{sb} + \sum f_{py} A_{pb} z_{pb} + \sum f_{yv} A_{sv} z_{sv} \quad (6.4.8-1)$$

此时, 斜截面的水平投影长度 c 可按下列条件确定:

$$V = \sum f_y A_{sb} \sin \alpha_s + \sum f_{py} A_{pb} \sin \alpha_p + \sum f_{yv} A_{sv} \quad (6.4.8-2)$$

式中: V ——斜截面受压区末端的剪力设计值;

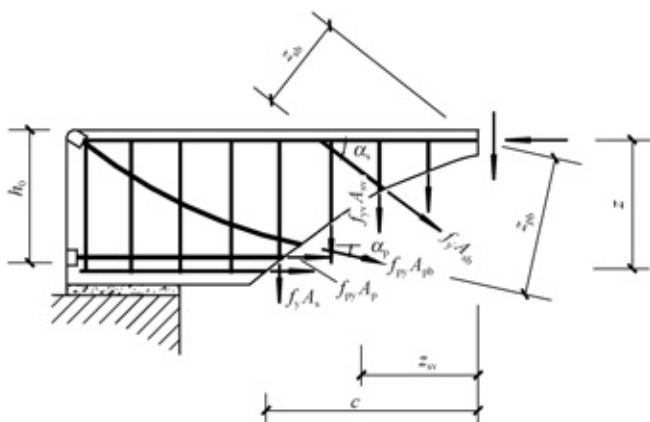


图 6.4.8 受弯构件斜截面受弯承载力计算

z ——纵向非预应力和预应力受拉钢筋的合力至受压区合力点的距离，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钢筋、预应力弯起钢筋的合力至斜截面受压区合力点的距离；

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。

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，锚固区内的纵向预应力筋抗拉强度设计值 f_{py} 在锚固起点处应取值为零，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。

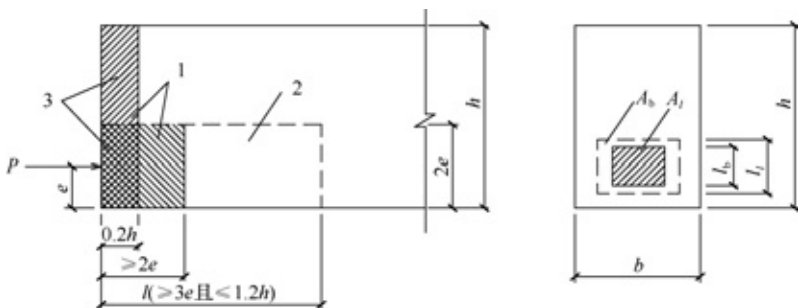
6.5 局部承压及冲切计算

6.5.1 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° ；钢垫板后应按本规程

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 $3e$ (e 为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)、但不大于 $1.2h$ (h 为构件端部截面高度),高度为 $2e$ 的附加防劈裂配筋区范围内,应均匀配置附加箍筋、钢筋网片或螺旋筋(图 6.5.1-1),配筋面积可按下式计算:

且体积配筋率不应小于 0.5%。



3—附近防端面裂缝配筋区

f_{vv} ——附加抗劈裂钢筋的抗拉强度设计值。

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 (图 6.5.1-2),其截面面积应符合下列公式要求:

$$A_{sv} = \frac{T_s}{f_{yv}} \quad (6.5.1-2)$$

$$T_s = \left(0.25 - \frac{e}{h}\right)P \quad (6.5.1-3)$$

式中: T_s ——锚固端端面拉力;

e ——截面重心线上部或下部预应力筋的合力点至截面近边缘的距离;

h ——构件端部截面高度。

当 $e > 0.2h$ 时,可根据实际情况适当配置构造钢筋。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。

当端部界面上部和下部均设有预应力筋时,附加防劈裂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。

在构件端面横向也应按上述方法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的混凝土强度。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,当节点原配筋能起到钢筋网片或螺旋箍筋的等效作用时,可少配或不配钢筋网片或螺旋筋。

6 当构件在端部有局部凹进时,应增设折线构造钢筋 (图 6.5.1-2) 或其他有效的构造钢筋。

6.5.2 配置间接钢筋的混凝土结构构件,其局部受压区的截面

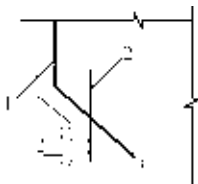


图 6.5.1-2 端部凹进处构造配筋
1—折线构造钢筋；2—竖向构造钢筋

尺寸应符合下列要求：

$$F_l \leq k\beta_c\beta_l f_c A_{ln} \quad (6.5.2-1)$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \quad (6.5.2-2)$$

式中： F_l ——局部受压面上作用的局部荷载或局部压力设计值；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值；

β_c ——混凝土强度影响系数，按本规程第 6.4.1 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；

A_{ln} ——混凝土局部受压净面积，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，按本规程第 6.5.3 条确定；

k ——结构系数：建筑结构为 1.35，桥梁结构为 1.3。

在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 对有粘结预应力混凝土构件取 1.2 倍张拉控制力；对无粘结和缓粘结预应力混凝土取 1.2 倍张拉控制力和 $f_{ptk}A_p$ 中的较大值；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；在正常使用阶段验算中， F_l 应取预应力筋的抗拉强度标准值 f_{ptk} 进行计算。

6.5.3 局部受压的计算底面积 A_b ，可由局部受压面积与计算底

面积按同心、对称的原则确定；对常用情况，可按图 6.5.3 取用。

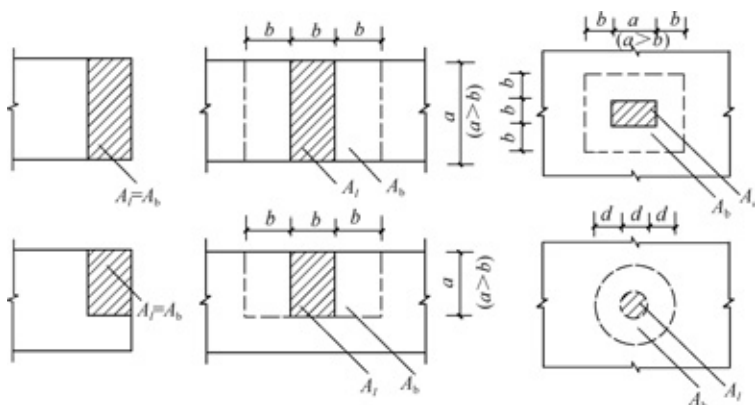


图 6.5.3 局部受压的计算底面积

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

6.5.4 当配置方格网式或螺旋式间接钢筋且其核心面积 $A_{cor} \geq A_l$ 时（图 6.5.4），局部受压承载力应符合下列规定：

$$F_l \leq 0.9(\beta_c \beta_l f_c + 2\alpha \rho_v \beta_{cor} f_{yv}) A_{ln} \quad (6.5.4-1)$$

当为方格网式配筋时（图 6.5.4a），其体积配筋率 ρ_v 应按下列公式计算：

$$\rho_v = \frac{n_1 A_{s1} l_1 + n_2 A_{s2} l_2}{A_{cor} s} \quad (6.5.4-2)$$

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。

当为螺旋式配筋时（图 6.5.4b），其体积配筋率 ρ_v 应按下列公式计算：

$$\rho_v = \frac{4A_{ss1}}{d_{cor} s} \quad (6.5.4-3)$$

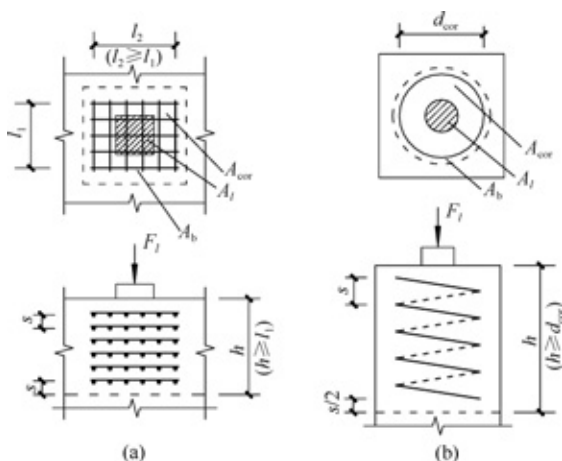


图 6.5.4 局部受压区的间接钢筋

(a) 方格网式配筋；(b) 螺旋式配筋

式中： β_{cor} ——配置间接钢筋的局部受压承载力提高系数，按本规程公式 (6.5.2-2) 计算，但 A_b 以 A_{cor} 代替，当 $A_{cor} > A_b$ 时，应取 $A_{cor} = A_b$ ；

f_y ——钢筋抗拉强度设计值；

α ——间接钢筋对混凝土约束的折减系数：当混凝土强度等级不大于 C50 时，取 1.0，当混凝土强度等级为 C80 时，取 0.85，其间按线性内插法确定。

A_{cor} ——方格网式或螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土核心面积，其重心应与 A_l 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（核心面积 A_{cor} 范围内单位混凝土体积所含间接钢筋的体积）；

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

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

A_{ss1} ——单根螺旋式间接钢筋的截面面积；

d_{cor} ——螺旋式间接钢筋内表面范围内的混凝土截面直径；

s ——方格网式或螺旋式间接钢筋的间距，宜取 30~80mm。

间接钢筋应配置在规定的高度 h 范围内（图 6.5.4），对方格网式钢筋，不应小于 4 片；对螺旋式钢筋，不应小于 4 圈。对柱接头， h 尚不应小于 $15d$ ， d 为柱的纵向钢筋直径。

6.5.5 在局部荷载或集中反力作用下，不配置箍筋或弯起钢筋的无粘结及缓粘结混凝土板，其受冲切承载力应符合下列规定（图 6.5.5）：

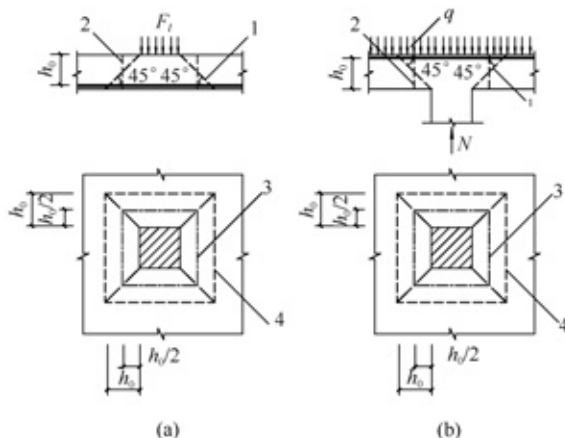


图 6.5.5 板受冲切承载力计算

(a) 局部荷载作用下；(b) 集中反力作用下

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

$$F_t \leq (0.7\beta_h f_t + k\sigma_{pc,m}) \eta \mu_m h_0 \quad (6.5.5-1)$$

公式 (6.5.5-1) 中的系数 η ，建筑结构应按下列两个公式计算，并取其中较小值：

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \quad (6.5.5-2)$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4\mu_m} \quad (6.5.5-3)$$

桥梁结构 η 取值为 1。

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

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；桥梁结构中当 $h \leq 300\text{mm}$ 时，取 $\beta_h = 1.0$ ；当 $h \geq 800\text{mm}$ 时，取 $\beta_h = 0.85$ ，其间按线性内插法取用；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

$\sigma_{pc,m}$ ——计算截面周长上两个方向混凝土有效预压应力按长度的加权平均值，其值宜控制在 $1.0 \sim 3.5\text{N/mm}^2$ 范围内；

μ_m ——计算截面的周长：距离局部荷载或集中反力作用面积周边 $h_0/2$ 处板垂直截面的最不利周长；当墩柱为圆形截面时，可将其换算为边长等于 0.8 倍直径的方形截面墩柱再取 μ_m ；

h_0 ——截面有效高度，取两个配筋方向的截面有效高度的平均值；

η_1 ——局部荷载或集中反力作用面积形状的影响系数；

η_2 ——计算截面周长与板截面有效高度之比的影响系数；

β_s ——局部荷载或集中反力作用面积为矩形时的长边与短边尺寸的比值： β_s 不宜大于 4；当 $\beta_s < 2$ 时，取 β_s 取 2；当面积为圆形时，取 β_s 取 2；

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

k ——结构系数：建筑结构为 0.25，桥梁结构为 0.15。

7 正常使用极限状态验算

7.1 一般规定

7.1.1 预应力混凝土结构应分别按荷载效应的标准组合与准永久组合对正常使用极限状态的结构构件进行验算，并应控制应力、变形、裂缝等计算值不大于相应的规定限值。荷载效应的标准组合与准永久组合应按本规程第 4.1.2 条规定计算。

7.1.2 正常使用极限状态验算时，构件截面应力的计算可采用一般的材料力学公式，截面几何特征可按下列规定采用：

- 1 先张法构件采用换算截面。
- 2 后张法构件，预应力孔道灌浆前采用净截面，预应力筋与混凝土粘结后采用换算截面。
- 3 截面应力对计算应力或控制条件影响不大时，也可采用毛截面计算。

7.2 预应力度验算

7.2.1 消压弯矩和消压轴力应符合下列规定：

1 预应力混凝土受弯构件的混凝土受拉边缘预压应力抵消到零时的消压弯矩，应按下式计算：

$$M_0 = \sigma_c \cdot W \quad (7.2.1-1)$$

式中： σ_c ——预加力作用下受弯构件混凝土受拉边缘的有效预压应力（计入构件自重引起的应力）；

W ——构件对应受拉边缘的截面抵抗矩。

2 预应力混凝土轴心受拉构件的混凝土预压应力抵消到零时的消压轴力应按下式计算：

$$N_0 = \sigma_c \cdot A \quad (7.2.1-2)$$

式中： σ_c ——预加力作用下轴心受拉构件混凝土有效预压应力；

A ——构件截面面积。

7.2.2 预应力混凝土构件的预应力度应按下式计算：

$$\text{受弯构件} \quad \lambda_0 = \frac{M_0}{M_k} \quad (7.2.2-1)$$

$$\text{轴拉构件} \quad \lambda_0 = \frac{N_0}{N_k} \quad (7.2.2-2)$$

式中： M_0 ——消压弯矩，见本规程第 7.2.1 条；

M_k ——荷载标准组合作用下控制截面的弯矩值；

N_0 ——消压轴力，见本规程第 7.2.1 条；

N_k ——荷载标准组合作用下控制截面的轴向拉力值。

7.2.3 建筑工程预应力混凝土结构（包括受拉构件）设计时，预应力度可近似采用预应力强度比度量，预应力强度比 λ 定义为：

$$\lambda = \frac{f_{py}A_p h_p}{f_{py}A_p h_p + f_y A_s h_s} \quad (7.2.3)$$

预应力强度比 λ 应根据构件的抗震等级加以确定。

7.2.4 预应力度的限值：全预应力混凝土 $\lambda_0 \geq 1$ ，部分预应力混凝土 $0 < \lambda_0 < 1$ 。

1 建筑结构应按部分预应力混凝土设计，预应力度宜满足 $\lambda_0 \leq 0.75$ 。

2 桥梁结构部分预应力混凝土构件分为两类：A 类构件，其控制截面受拉边缘的拉应力受到限制；B 类构件，其控制截面受拉边缘的拉应力大于限值直至出现裂缝。

桥梁结构（包括城市轨道桥和城市道路桥）可根据跨径和所处环境条件，采用全预应力混凝土或部分预应力混凝土设计。地处有严重侵蚀性物质严重影响的桥梁应按 A 类构件设计。

7.3 应力验算

7.3.1 按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。

7.3.2 预应力混凝土受弯构件斜截面抗裂验算时，应分别对截

面上的混凝土主拉应力和主压应力进行验算：

1 混凝土主拉应力

1) 裂缝控制等级为一级的构件应符合下列规定：

$$\sigma_{tp} \leq 0.85f_{tk} \quad (7.3.2-1)$$

2) 裂缝控制等级为二级的构件应符合下列规定：

$$\sigma_{tp} \leq 0.95f_{tk} \quad (7.3.2-2)$$

2 混凝土主压应力

对裂缝控制等级为一级和二级的构件均应符合下列规定：

$$\sigma_{cp} \leq 0.6f_{ck} \quad (7.3.2-3)$$

式中： σ_{tp} 、 σ_{cp} ——混凝土的主拉应力、主压应力，按本规程第 7.3.3 条确定。

此时，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。

7.3.3 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} 按下列公式计算：

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{tp} \\ \sigma_{cp} \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau^2} \quad (7.3.3-1)$$

$$\sigma_x = \sigma_{pc} + \frac{M_k y_0}{I_0} \quad (7.3.3-2)$$

$$\tau = \frac{(V_k - \sum \sigma_{pc} A_{pb} \sin \alpha_p) S_0}{I_0 b} \quad (7.3.3-3)$$

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；

σ_y ——由集中荷载标准值 F_k 产生的混凝土竖向压应力；

τ ——由剪力值 V_k 和预应力弯起钢筋的预加力在计算纤维处产生的混凝土剪应力，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；
- y_0 ——换算截面重心至计算纤维处的距离；
- I_0 ——换算截面惯性矩；
- V_k ——按荷载效应的标准组合计算的剪力值；
- 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；
- σ_{pe} ——预应力弯起钢筋的有效预应力；
- A_{pb} ——计算截面上同一弯起平面内的预应力弯起钢筋的截面积；
- α_p ——计算截面上预应力弯起钢筋的切线与构件纵向轴线的夹角。

注：公式（7.3.3-1）、公式（7.3.3-2）中的 σ_x 、 σ_y 、 σ_{pe} 和 $M_k y_0 / I_0$ ，当为拉应力时，以正值代入；当为压应力时，以负值代入。

7.3.4 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，可按图 7.3.4 确定，其应力的最大值可按下列公式计算：

$$\sigma_{y, \max} = \frac{0.6F_k}{bh} \quad (7.3.4-1)$$

$$\tau_F = \frac{\tau^l - \tau^r}{2} \quad (7.3.4-2)$$

$$\tau^l = \frac{V_k^l S_0}{I_0 b} \quad (7.3.4-3)$$

$$\tau^r = \frac{V_k^r S_0}{I_0 b} \quad (7.3.4-4)$$

式中： 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；

τ_F ——集中荷载标准值 F_k 作用截面上的剪应力；

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。

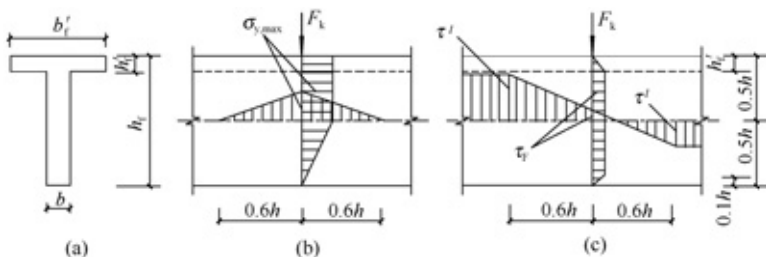


图 7.3.4 预应力混凝土吊车梁在集中力作用点附近的应力分布

(a) 截面；(b) 竖向压应力 σ_y 分布；(c) 剪应力 τ 分布

7.3.5 在荷载标准组合和准永久组合下，预应力混凝土受弯构件抗裂验算时截面边缘混凝土的法向应力应按下列公式计算：

$$\sigma_{ck} = \frac{M_k}{W_0} \quad (7.3.5-1)$$

$$\sigma_{cq} = \frac{M_q}{W_0} \quad (7.3.5-2)$$

式中： W_0 ——构件换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

M_q ——荷载准永久组合作用下控制截面的弯矩。

7.3.6 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：

$$\sigma_{pc} = \frac{N_{p0}}{A_0} \pm \frac{N_{p0} e_{p0}}{I_0} y_0 \quad (7.3.6-1)$$

相应阶段预应力筋的有效应力：

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l - \alpha_E \sigma_{pc} \quad (7.3.6-2)$$

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：

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (7.3.6-3)$$

2 后张法构件

由预加力产生的混凝土法向应力：

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_n} \pm \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n + \sigma_{p2} \quad (7.3.6-4)$$

相应阶段预应力筋的有效应力：

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (7.3.6-5)$$

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：

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pc} \quad (7.3.6-6)$$

式中： A_n ——净截面面积，即扣除孔道、凹槽等削弱部分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；

A_0 ——换算截面面积，包括净截面面积以及全部纵向预应力筋截面面积换算成混凝土的截面面积；

I_0 、 I_n ——换算截面惯性矩、净截面惯性矩；

e_{p0} 、 e_{pn} ——换算截面重心、净截面重心至预加力作用点的距离；

y_0 、 y_n ——换算截面重心、净截面重心至计算纤维处的距离；

σ_l ——相应阶段的预应力损失值；

α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

N_{p0} 、 N_p ——先张法、后张法构件混凝土法向预应力等于零时预应力筋和普通钢筋的合力，可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 第 10.1.7 条计算；

σ_{p2} ——由预应力次内力引起的混凝土截面法向应力。

注：在式 (7.3.6-1)、式 (7.3.6-4) 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 (7.3.6-2)、式 (7.3.6-6) 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。

7.3.7 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，即在构件端部应力值取为零，在传递长度的末端取有效预应力值 σ_{pe} (图 7.3.7)，预应力筋的预应力传递长度 l_{tr} 应按本规程第 7.3.8 条确定。

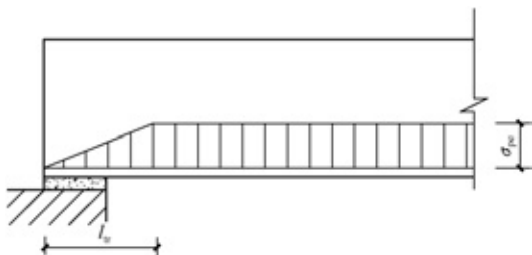


图 7.3.7 预应力传递长度范围内有效预应力值的变化

7.3.8 先张法构件预应力筋的预应力传递长度 l_{tr} 应按下列公式计算：

$$l_{tr} = \alpha \frac{\sigma_{pe}}{f'_{tk}} d \quad (7.3.8)$$

式中： σ_{pe} ——放张时预应力筋的有效预应力；

d ——预应力筋的公称直径；

α ——预应力筋的外形系数，按表 7.3.8 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。

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 7.3.8 预应力筋的外形系数

钢筋类型	刻痕钢丝	螺旋肋钢丝	三股钢筋	七股钢筋
α	0.19	0.13	0.16	0.17

7.3.9 桥梁结构构件正常使用极限状态的应力限值应按

表 7.3.9取用。

表 7.3.9 正常使用极限状态的应力限值

项目		城市轨道交通	城市道路桥梁
A 类构件的混凝土拉应力		$0.7f_{tk}$	$0.7f_{tk}$
使用荷载作用下 预应力筋的应力	钢丝、钢绞线	$0.6f_{ptk}$	$0.65f_{ptk}$
	预应力螺纹钢筋	$0.6f_{ptk}$	$0.8f_{ptk}$
使用荷载作用下	混凝土压应力	$0.5f_{ck}$	$0.5f_{ck}$
	混凝土主压应力	—	$0.6f_{ck}$
	混凝土主拉应力	$0.7f_{tk}$	$0.7f_{tk}$
	箍筋按构造要求设置时的 混凝土主拉应力	$0.5f_{tk}$	$0.5f_{tk}$

- 注：1 城市轨道交通的应力限值只适用于只计主力（恒荷载加活荷载）的情况；考虑主力及附加力（制动力及其他附加力）时，应力限值应适当提高，可参照现行铁路桥涵设计规范；
- 2 城市道路及桥梁的应力限值只适用于作用效应标准组合；作用效应准永久组合时应力限值可参照现行公路桥涵设计规范。

7.3.10 在分块结构中，对承受剪切的横向接缝做如下验算：

$$V = \mu N_p \tag{7.3.10}$$

式中：V——作用在结构上的荷载在接缝中产生的剪力；

N_p ——由预应力筋（扣除预应力损失）引起的挤压力；

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。

7.4 变 形 验 算

7.4.1 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，且不应大于本规程表 7.4.8规定的限值。

在等截面构件中，可假定各同号弯矩区段内的刚度相等，并取用该区段内最大弯矩处的刚度。当计算跨度内的支座截面刚度不大于跨中截面刚度的两倍或不小于跨中截面刚度的二分之一

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。

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大于本规程第 7.4.8 条规定的限值。

7.4.2 矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面受弯构件，按荷载标准组合并考虑荷载长期作用影响的刚度 B 可按下列公式计算：

$$B = \frac{M_k}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s \quad (7.4.2)$$

式中： M_k ——按荷载标准组合计算的弯矩，取计算区段内的最大弯矩值；

M_q ——按荷载准永久组合计算的弯矩，取计算区段内的最大弯矩值；

B_s ——荷载标准组合作用下受弯构件的短期刚度，按本规程第 7.4.3 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，按本规程第 7.4.5 条取用。

7.4.3 在荷载标准组合作用下，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

$$B_s = 0.85 E_c I_0 \quad (7.4.3-1)$$

2 允许出现裂缝的构件

$$B_s = \frac{0.85 E_c I_0}{\kappa_{cr} + (1 - \kappa_{cr}) \omega} \quad (7.4.3-2)$$

$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{M_k} \quad (7.4.3-3)$$

有粘结和缓粘结预应力混凝土受弯构件刚度公式中 ω 按式 (7.4.3-4) 计算。

$$\omega = \left(1.0 + \frac{0.21}{\alpha_E \rho} \right) (1 + 0.45 \gamma_f) - 0.7 \quad (7.4.3-4)$$

配有普通高强钢筋 (HRB500 级) 的有粘结预应力混凝土受

弯构件刚度公式中 ω 可按式 (7.4.3-5) 计算。

$$\omega = \frac{0.85}{2.1\alpha_E\rho + 0.14} \quad (7.4.3-5)$$

无粘结预应力混凝土受弯构件刚度公式中 ω 按式 (7.4.3-6) 计算。

$$\omega = (1 + 0.8\lambda + \frac{0.21}{\alpha_E\rho})(1 + 0.45\gamma_f) \quad (7.4.3-6)$$

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk})W_0 \quad (7.4.3-7)$$

$$\gamma_f = \frac{(b_f - b)h_f}{bh_0} \quad (7.4.3-8)$$

$$\rho = \frac{\alpha_1 A_p + A_s}{bh_0} \quad (7.4.3-9)$$

$$\lambda = \frac{A_p \sigma_{pe}}{A_p \sigma_{pe} + A_s f_s} \quad (7.4.3-10)$$

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；对灌浆的后张有粘结预应力筋，取 $\alpha_1 = 1.0$ ；对后张无粘结预应力筋，取 $\alpha_1 = 0.3$ ；

I_0 ——换算截面惯性矩；

γ_f ——受拉翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值；

b_f 、 h_f ——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；

γ ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数，按本规程第 7.4.4 条确定；

λ ——无粘结预应力筋配筋指标与综合配筋指标的比值。

3 对预压时预拉区出现裂缝的构件， B_s 应降低 10%。

7.4.4 混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数 γ 可按下列公式

计算：

$$\gamma = \left(0.7 + \frac{120}{h}\right) \gamma_m \quad (7.4.4)$$

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 7.4.4 取用；

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

表 7.4.4 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 形截面或箱形截面		翼缘位于受拉区的倒 T 形截面		圆形和环形截面
			$b_f/b \leq 2$, h_f/h 为任意值	$b_f/b > 2$, $h_f/h < 0.2$	$b_f/b \leq 2$, h_f/h 为任意值	$b_f/b > 2$, $h_f/h < 0.2$	
γ_m	1.55	1.50	1.45	1.35	1.50	1.40	1.6~ 0.24 r_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。

7.4.5 预应力混凝土受弯构件考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数 θ 可取 2.0。

7.4.6 预应力混凝土受弯构件在使用阶段的预加力反拱值，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，计算中预应力筋的应力应扣除全部预应力损失。简化计算时，可将计算的反拱值乘以增大系数 2.0。

对重要的或特殊的预应力混凝土受弯构件的长期反拱值，宜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；对永久荷载较小的构件，应考虑反拱过大对使用的不利影响。

7.4.7 对预应力混凝土构件应采取措施控制反拱和挠度，并应符合下列规定：

1 当考虑反拱后计算的构件长期挠度不符合本规程第 7.4.8 条的有关规定时，可采用施工预先起拱等方式控制挠度。

2 对永久荷载相对于可变荷载较小的预应力混凝土构件，应考虑反拱过大对正常使用的不利影响，并应采取相应的设计和施工措施。

7.4.8 预应力混凝土构件允许挠度应符合下列规定：

1 城市轨道交通，在简支梁的跨中由静活载（即不计列车竖向动力作用）引起的竖向挠度，不应大于下列的允许值：

$$l \leq 30\text{m} \quad l/2000$$

$$l > 30\text{m} \quad l/1500$$

式中： l ——计算跨径。

当由永久荷载和静活载引起的竖向挠度不大于 15mm 或 $l/1600$ 时，可不设预拱度。大于上述数值时应设预拱度。预拱度曲线形状与永久荷载加 1/2 静活载所产生的挠度曲线基本相同，但方向相反。

2 城市道路及公路桥梁，由荷载短期效应组合并考虑荷载长期效应影响产生的长期挠度不应大于下列的允许值：

$$\text{梁式桥主梁跨中} \quad l/600$$

$$\text{梁式桥主梁悬臂端} \quad l_1/300$$

式中： l_1 ——悬臂长度。

当预加应力产生的长期反拱值大于按荷载短期效应组合计算的长期挠度时，可不设预拱度；当预加应力的长期反拱值小于按荷载短期效应组合计算的长期挠度时，应设预拱度，其值应按该

项荷载的挠度值与预加应力长期反拱值之差采用。

3 建筑结构受弯构件的最大挠度应按荷载效应的标准组合并考虑荷载长期作用影响进行计算，其计算值不应大于表 7.4.8 的允许值。

表 7.4.8 建筑结构受弯构件的允许挠度

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

- 注：1 如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值（包括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 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。

7.5 裂缝控制验算

7.5.1 预应力混凝土结构构件正截面的裂缝控制等级分为下述三级：

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；

二级Ⅰ类——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标准值；

二级Ⅱ类——一般允许出现裂缝的构件，按荷载标准组合并考虑长期作用影响计算时，构件的最大裂缝宽度不应大于表 7.5.2-1 规定的最大裂缝宽度值；按荷载效应准永久组合计算时，构件受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土抗拉强度标准值；

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影响计算时，构件的最大裂缝宽度不应大于表 7.5.2-1 规定的最大裂缝宽度限值。

7.5.2 不同裂缝控制等级下最大裂缝宽度限值取值要求：

1 预应力混凝土结构构件应根据《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定的环境类别，按表 7.5.2-1 的规定选用。

表 7.5.2-1 普通及缓粘结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

环境类别		普通预应力混凝土结构构件		缓粘结预应力混凝土构件			
		裂缝控制等级	ω_{lim} (mm)	三级抗裂	二级抗裂		一级抗裂
					Ⅱ类	Ⅰ类	
一		三级	0.20	0.30(0.40)	0.20	—	—
二	a	二级Ⅱ类	0.10	0.20	0.10	—	—
	b	二级Ⅰ类	—	0.20	—	—	—
三		一级	—	0.20	—	—	—

- 注：1 表中的规定适用于采用预应力钢丝、钢绞线及预应力螺纹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Ⅰ类裂缝控制等级进行验算；对一类环境下的预应力混凝土屋面梁、托梁及单向板，应按二级Ⅱ类裂缝控制等级进行验算；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小于二级Ⅰ类的构件进行验算；
- 3 表中规定的预应力混凝土构件的裂缝控制等级和最大裂缝宽度限值仅适用于正截面的验算；预应力混凝土构件的斜截面裂缝控制验算应符合本规程第 7.3 节的有关规定；
- 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用于验算荷载作用引起的最大裂缝宽度。

2 桥梁结构构件的最大裂缝宽度限值按表 7.5.2-2 的规定

选用。

表 7.5.2-2 裂缝宽度限值 (mm)

构件种类	环境条件	钢丝、钢绞线	预应力螺纹钢筋
城市轨道交通	无严重环境腐蚀	0.10	0.10
	有严重环境腐蚀	0	0
公路桥梁	I 类和 II 类环境	0.10	0.20
	III 类和 IV 类环境	0	0.15

注：参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 和《铁路桥涵设计基本规范》TB 10002.1 制定。

7.5.3 预应力混凝土构件应根据本规程第 7.5.2 条的规定按所处环境类别确定相应的裂缝控制等级和最大裂缝宽度限值，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，在荷载标准组合下构件受拉边缘应力应符合下列规定：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (7.5.3-1)$$

2 二级 I 类裂缝控制等级，在荷载标准组合下构件受拉边缘应力应符合下列规定：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (7.5.3-2)$$

在荷载准永久组合下构件受拉边缘应力宜符合下列规定：

$$\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (7.5.3-3)$$

3 二级 II 类裂缝控制等级，构件最大裂缝宽度可按荷载标准组合并考虑长期作用影响的效应计算。最大裂缝宽度应符合下列规定：

$$\omega_{\max} \leq \omega_{\lim} \quad (7.5.3-4)$$

且在荷载准永久组合下，构件受拉边缘应力尚应符合下列规定：

$$\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (7.5.3-5)$$

4 三级裂缝控制等级，构件最大裂缝宽度可按荷载标准组

合并考虑长期作用影响的效应计算。最大裂缝宽度应符合下列规定：

$$\omega_{\max} \leq \omega_{\lim} \quad (7.5.3-6)$$

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

σ_{pc} ——扣除全部预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力；

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值；

$\omega_{\max}$ ——按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度，按本规程第 7.5.4 条计算；

$\omega_{\lim}$ ——最大裂缝宽度限值按本规程第 7.5.2 条采用。

注：对受弯和大偏心受压的预应力混凝土构件，其预拉区在施工阶段出现裂缝的区段，公式（7.5.3-1）至公式（7.5.3-5）中的 σ_{pc} 应乘以系数 0.9。

7.5.4 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，按荷载标准组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度（mm）可按下列公式计算：

$$\omega_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{sk}}}{E_s} (1.9c_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}}) \quad (7.5.4-1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{\text{tk}}}{\rho_{\text{te}} \sigma_{\text{sk}}} \quad (7.5.4-2)$$

$$d_{\text{eq}} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (7.5.4-3)$$

有粘结和无粘结预应力混凝土构件的 ρ_{te} 应分别采用公式（7.5.4-4）和公式（7.5.4-5）计算：

$$\rho_{\text{te}} = \frac{A_s + A_p}{A_{\text{te}}} \quad (7.5.4-4)$$

$$\rho_{\text{te}} = \frac{A_s}{A_{\text{te}}} \quad (7.5.4-5)$$

式中： α_{cr} ——构件受力特征系数，按表 7.5.4-1 采用；

ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数：当 $\psi < 0.2$ 时，取 $\psi = 0.2$ ；当 $\psi > 1$ 时，取 $\psi = 1$ ；对直接承受重复荷载的构件，取 $\psi = 1$ ；

σ_{sk} ——按荷载标准组合计算的预应力混凝土构件纵向受拉钢筋的等效应力，按本规程第 7.5.5 条计算；

E_s ——钢筋弹性模量；

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

ρ_{te} ——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率：在最大裂缝宽度计算中，当 $\rho_{te} < 0.01$ 时，取 $\rho_{te} = 0.01$ ；

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

A_s ——受拉区纵向普通钢筋截面面积；

A_p ——受拉区纵向预应力筋截面面积；

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

d_i ——受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径 (mm)，对于有粘结预应力钢绞线束的直径取为 $\sqrt{n_1 d_{pl}}$ ，其中 d_{pl} 为单根钢绞线的公称直径， n_1 为单根钢绞线数；

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 7.5.4-2 采用。

注：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 7.5.4-1 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 7.5.4-2 钢筋的相对粘结特性系数

钢筋类别	普通钢筋		先张法预应力筋			后张法预应力筋			缓粘结 预应力筋
	光面 钢筋	带肋 钢筋	带肋 钢筋	螺旋肋 钢丝	钢绞线	带肋 钢筋	钢绞 线	光面 钢丝	
ν_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 0.8 倍取用。

7.5.5 在荷载标准组合下，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

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k - N_{p0} \pm N_2}{A_p + A_s} \tag{7.5.5-1}$$

2 受弯构件

对有粘结预应力混凝土受弯构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k \pm M_2 - N_{p0}(z - e_p) - N_2(z - \frac{h}{2} + a)}{(A_p + A_s)z} \tag{7.5.5-2}$$

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma'_f) \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0 \tag{7.5.5-3}$$

$$e = \frac{M_k \pm M_2 + N_{po}e_p + N_2 \left(\frac{h}{2} - a \right)}{N_{p0} + N_2} \tag{7.5.5-4}$$

$$\gamma'_f = \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0} \tag{7.5.5-5}$$

对无粘结预应力混凝土受弯构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k \pm M_2 - N_{p0}(z - e_p) - N_2 \left(z - \frac{h}{2} + a \right)}{(0.3A_p + A_s)z} \quad (7.5.5-6)$$

3 偏心受拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k \pm M_2 + (N_k \pm N_2) \left(z - \frac{h}{2} + a \right) - N_{p0}(z - e_p)}{(\alpha_1 A_p + A_s)z} \quad (7.5.5-7)$$

$$e = \frac{M_k \pm M_2 + N_{p0}e_p - (N_k \pm N_2) \left(\frac{h}{2} - a \right)}{N_{p0} - (N_k \pm N_2)} \quad (7.5.5-8)$$

式中 z 、 γ'_f 的取值同式 (7.5.5-3)、式 (7.5.5-5)。

4 偏心受压构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k \pm M_2 - (N_k \pm N_2) \left(z - \frac{h}{2} + a \right) - N_{p0}(z - e_p)}{(\alpha_1 A_p + A_s)z} \quad (7.5.5-9)$$

$$e = \frac{M_k \pm M_2 + N_{p0}e_p + (N_k \pm N_2) \left(\frac{h}{2} - a \right)}{N_{p0} + (N_k \pm N_2)} \quad (7.5.5-10)$$

式中 z 、 γ'_f 的取值同式 (7.5.5-3)、式 (7.5.5-5)。

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk})W_0 \quad (7.5.5-11)$$

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

z ——受拉区纵向普通钢筋和预应力筋合力点至截面受压区合力点的距离；

α_1 ——无粘结预应力筋的等效折减系数，取 $\alpha_1 = 0.3$ ；对

灌浆的后张有粘结预应力筋，取 $\alpha_1 = 1.0$ ；

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

e ——轴向压力作用点至纵向受拉普通钢筋合力点的距离；

M_2 ——由预加力在后张法预应力混凝土超静定结构中产生的次弯矩；

N_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；

γ'_f ——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值；

b'_f 、 h'_f ——受压翼缘的宽度、高度，在公式 (7.5.5-5) 中，当 $h'_f > 0.2h_0$ 时，取 $h'_f = 0.2h_0$ 。

注：在式 (7.5.5-2)、式 (7.5.5-4)、式 (7.5.5-6)～式 (7.5.5-10) 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。在式 (7.5.5-1)、式 (7.5.5-7)～式 (7.5.5-10) 中，当 N_2 与 N_k 的作用方向相同时取加号；当 N_2 与 N_k 的作用方向相反时取减号。

8 装配式预应力混凝土水平叠合构件设计

8.1 一般规定

8.1.1 施工阶段不加支撑的叠合式受弯构件，应对叠合构件及其预制构件部分分别进行计算；预制构件部分应按本规程第 7 章对受弯构件的规定进行计算；叠合构件应按本章对预应力叠合构件的规定计算。

施工阶段设有可靠支撑的叠合式受弯构件，可按普通受弯构件计算，叠合构件斜截面受剪承载力和叠合面受剪承载力应按本规程第 8.2.2 条和 8.2.3 条分别计算。

8.1.2 施工阶段不加支撑的叠合式受弯构件，其内力应分别按下列两个阶段计算：

1 第一阶段后浇的叠合层混凝土未达到强度设计值之前的阶段。荷载由预制预应力构件承担，预制预应力构件按简支构件计算；荷载包括预制构件自重、叠合层自重以及本阶段的施工可变荷载。

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

- 1) 施工阶段计入预制构件、叠合层混凝土、面层、吊顶等自重以及本阶段的施工活荷载；
- 2) 使用阶段计入叠合构件、预制楼板、面层、吊顶等自重以及使用阶段的可变荷载。

对后张预应力叠合受弯构件，应计算后张拉的预应力在超静定结构中的预应力效应并参与组合计算。

8.2 预应力叠合构件承载力计算

8.2.1 预制构件和叠合构件的正截面受弯承载力应按本规程中

第 6 章相关条文规定进行计算。后张预应力叠合受弯构件中的预制构件可采用普通混凝土构件、先张法预应力混凝土构件及后张法预应力混凝土构件，弯矩设计值应按下列规定取用：

预制构件

$$M_1 = M_{1G} + M_{1Q} \quad (8.2.1-1)$$

叠合构件的正弯矩区段

$$M = M_{1G} + M_{2G} + M_{2Q} \quad (8.2.1-2)$$

叠合构件的负弯矩区段

$$M = M_{2G} + M_{2Q} \quad (8.2.1-3)$$

式中： M_{1G} ——预制构件自重和叠合层后浇混凝土自重在设计截面产生的弯矩设计值；

M_{2G} ——第二阶段面层、吊顶等自重在设计截面产生的弯矩设计值；

M_{1Q} ——第一阶段施工可变荷载在设计截面产生的弯矩设计值；

M_{2Q} ——第二阶段可变荷载在设计截面产生的弯矩设计值，取本阶段施工可变荷载和使用阶段可变荷载在设计截面产生的弯矩设计值中的较大值。

对后张预应力叠合受弯构件，后张预应力在超静定结构中引起的次内力应参与组合计算。当次内力对结构不利时，作用分项系数应取 1.2，有利时应取 1.0。

在计算中，正弯矩区段的混凝土强度等级，按叠合层后浇混凝土取用；负弯矩区段的混凝土强度等级，按计算截面受压区的实际情况取用。

8.2.2 预制构件和叠合构件的斜截面抗剪承载力，应按本规程第 6.4 节进行计算，其中，剪力设计值应按下列规定取用：

预制预应力构件 $V_1 = V_{1G} + V_{1Q} \quad (8.2.2-1)$

叠合构件 $V = V_{1G} + V_{2G} + V_{2Q} \quad (8.2.2-2)$

式中： V_{1G} ——预制预应力构件自重和叠合层混凝土自重在设计截面产生的剪力设计值；

V_{2G} ——第二阶段面层、吊顶等自重在设计截面产生的剪力设计值；

V_{1Q} ——第一阶段施工可变荷载在设计截面产生的剪力设计值；

V_{2Q} ——第二阶段可变荷载在设计截面产生的剪力设计值，取本阶段施工可变荷载和使用阶段可变荷载在设计截面产生的剪力设计值中的较大值。

对后张预应力叠合受弯构件，后张预应力在超静定结构中引起的次剪力应参与组合计算，当次剪力对结构不利时，作用分项系数应取 1.2，有利时应取 1.0。

在计算中，叠合构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值 V_{cs} 应取叠合层和预制构件中较低的混凝土强度等级进行计算，且不小于预制构件的受剪承载力设计值；对预应力混凝土叠合构件，不考虑预应力对受剪承载力的有利影响，取 $V_p = 0$ 。

8.2.3 当叠合梁符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的构造规定时，其叠合面的受剪承载力应符合下列规定：

$$V \leq 1.2 f_t b h_0 + 0.85 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8.2.3-1)$$

此处，混凝土的抗拉强度设计值 f_t 取叠合层和预制构件中的较小值。

对不配箍筋的叠合板，当符合本规程第 8.4.2 条的构造规定时，其叠合面的受剪强度应满足以下公式的要求：

$$\frac{V}{b h_0} \leq 0.4 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (8.2.3-2)$$

8.3 预应力叠合构件正常使用极限状态验算

8.3.1 预应力混凝土叠合式受弯构件，其预制构件和叠合构件均应进行正截面抗裂验算。此时，在荷载效应的标准组合下，抗裂验算边缘混凝土的拉应力不应大于预制构件的混凝土抗拉强度标准值 f_{tk} 。抗裂验算边缘混凝土的法向应力应按下列公式计算：

$$\text{预制构件} \quad \sigma_{\text{ck}} = \frac{M_{1\text{k}}}{W_{01}} \quad (8.3.1-1)$$

$$\text{叠合构件} \quad \sigma_{\text{ck}} = \frac{M_{1\text{Gk}}}{W_{01}} + \frac{M_{2\text{k}}}{W_0} \quad (8.3.1-2)$$

式中： $M_{1\text{Gk}}$ ——预制构件自重和叠合层混凝土自重标准值在计算截面产生的弯矩值；

$M_{1\text{k}}$ ——第一阶段荷载效应标准组合下在计算截面的弯矩值，取 $M_{1\text{k}} = M_{1\text{Gk}} + M_{1\text{Qk}}$ ，此处， $M_{1\text{Qk}}$ 为第一阶段施工可变荷载标准值在计算截面产生的弯矩值；

$M_{2\text{k}}$ ——第二阶段荷载效应标准组合下在计算截面上的弯矩值，取 $M_{2\text{k}} = M_{2\text{Gk}} + M_{2\text{Qk}}$ ，此处 $M_{2\text{Gk}}$ 为面层、吊顶等自重标准值在计算截面产生的弯矩值； $M_{2\text{Qk}}$ 为使用阶段可变荷载标准值在计算截面产生的弯矩值；

W_{01} ——预制构件换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

W_0 ——叠合构件换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩，此时，叠合层的混凝土截面面积应按弹性模量比换算成预制构件混凝土的截面面积。

8.3.2 预应力混凝土叠合构件应按本规程第 7.3.2 条的规定进行斜截面抗裂验算。

8.3.3 叠合构件应按本规程第 7.4.1 条的规定进行正常使用极限状态下的挠度验算，其中，叠合式受弯构件按荷载效应标准组合并考虑长期作用影响的刚度可按下列公式计算：

$$B = \frac{M_{\text{k}}}{\left(\frac{B_{\text{s2}}}{B_{\text{s1}}} - 1\right) + (\theta - 1)M_{\text{q}} + M_{\text{k}}} B_{\text{s2}} \quad (8.3.3-1)$$

$$M_{\text{k}} = M_{1\text{Gk}} + M_{2\text{k}} \quad (8.3.3-2)$$

$$M_{\text{q}} = M_{1\text{Gk}} + M_{2\text{Gk}} + \phi_{\text{q}} M_{2\text{Gk}} \quad (8.3.3-3)$$

式中： θ ——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数，按本规程第 7.4.5 条采用；

M_k ——叠合构件按荷载效应的标准组合计算的弯矩值；
 M_q ——叠合构件按荷载效应的准永久组合计算的弯矩值；
 B_{s1} ——预制构件的短期刚度，按本规程第 8.3.4 条取用；
 B_{s2} ——叠合构件第二阶段的短期刚度，按本规程第 8.3.4 条取用；
 ψ_q ——第二阶段可变荷载的准永久值系数。

8.3.4 荷载效应标准组合下预应力混凝土叠合受弯构件正弯矩区段内的短期刚度，可按下列规定计算：

1 预制构件的短期刚度 B_{s1} 可按本规程公式 (7.4.3-1) 计算。

2 叠合构件第二阶段的短期刚度可按下列公式计算：

$$B_{s2} = 0.7E_{cl}I_0 \quad (8.3.4)$$

式中： E_{cl} ——预制构件的混凝土弹性模量；

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

8.3.5 荷载效应标准组合下预应力混凝土叠合受弯构件负弯矩区段内第二阶段的短期刚度 B_{s2} 可按钢筋混凝土构件短期刚度公式计算。

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

8.4 预应力叠合构件构造要求

8.4.1 预应力混凝土叠合梁除应符合普通梁的构造要求外，尚应符合下列规定：

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

2 在承受静力荷载为主的叠合梁中，预制构件的叠合面可采用凹凸不小于 4mm 的自然粗糙面。

3 叠合层混凝土的厚度不宜小于 100mm，叠合层的混凝土强度等级不应小于 C30。

8.4.2 叠合板的预制板表面应做成凹凸不小于 4mm 的人工粗糙面或直接拉毛。叠合层的混凝土强度等级不应小于 C25。承受较大荷载的叠合板，宜在预制板内设置伸入叠合层的构造钢筋。

9 超长结构的预应力设计

9.1 一般规定

9.1.1 超长结构和广义超长结构因使用条件不适合设置伸缩缝时，可优先考虑采用预应力技术。

9.1.2 超长结构设计除应考虑常规荷载工况下作用的效应外，还应考虑混凝土收缩、徐变和温度变化等间接作用在结构中产生的效应。

9.1.3 超长结构设计应考虑结构约束（次内力）对预应力效应的影响。

9.1.4 超长预应力结构设计时，宜考虑预应力施工方案对预应力效应的影响，必要时可采取监测技术确定预应力的张拉顺序、张拉时间等参数。

大面积或超长现浇预应力混凝土楼盖，应根据平面布置特点和约束情况、超长预应力筋施工和预应力损失、大面积混凝土施工和收缩变形，以及模板和支撑的流水作业等确定。施工顺序可采用中心岛式、递推式、跳仓式或组合式方法。

9.1.5 超长混凝土结构在采用预应力技术减小混凝土收缩和降温作用的影响时，应合理布置预应力筋，同时宜采取优化混凝土配合比、配置温度构造钢筋、设置后浇带、加强带、分段施工、加强养护和保温等配套措施。

9.2 超长结构计算原则

9.2.1 超长结构进行间接作用效应分析时，可采用考虑混凝土收缩徐变效应和预应力筋松弛效应的分析方法。基本结构构件的计算模型宜按以下原则确定：

1 梁、柱、支撑等杆系构件可简化为一维单元；墙、板等

构件可简化为二维单元；复杂混凝土结构、大体积混凝土结构、结构节点或局部区域需做精细分析时，宜采用三维实体单元。

2 分析模型中宜按实际情况建立弹性楼板单元，并应均匀、规则划分，单元数量应根据工程整体规模进行控制。

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

4 可采用按配筋率调整构件单元等效刚度的方式考虑混凝土中普通钢筋对结构的影响。

5 计算模型应能体现施工过程对结构受力的影响。

9.2.2 在计算混凝土收缩和温度作用产生的内力时，可将混凝土收缩折算为当量温差，并应符合下列规定：

1 采用弹性方法计算时，应考虑混凝土徐变的影响；

2 计算温度作用下的结构内力，以及将混凝土收缩量折算成当量温差时，混凝土线膨胀系数 α_c 宜取 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ；

3 混凝土的收缩量宜根据当地工程经验确定；无工程经验时，可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定取用；

4 温度作用宜取为结构最高初始平均温度与结构最低平均温度之差。

9.2.3 当采用弹性方法分析超长结构在间接作用下的内力时，计算模型中的单元刚度应考虑裂缝、徐变的影响。

9.2.4 超长结构平面形状宜简单规则，平面变化处宜平缓，避免出现急剧凹入、蜂腰和开洞。

9.2.5 混凝土的收缩变形宜采用收缩当量温降 $\Delta T'$ 。当量温降的取值可根据收缩应变经验公式计算或实测的混凝土凝结硬化收缩应变 $\epsilon(T)$ ，采用式（9.2.5）进行计算：

$$\Delta T' = \epsilon(T) / \alpha \quad (9.2.5)$$

式中： $\epsilon(T)$ ——混凝土的收缩应变；

α ——混凝土的线膨胀系数。

9.2.6 温度作用的计算可采用季节温差 ΔT 。季节温差为结构

混凝土初始温度与正常使用阶段结构最高平均温度或最低平均温度的差值。

1 对结构最大温升的工况：

$$\Delta T = T_{s,\max} - T_{0,\min} \quad (9.2.6-1)$$

式中： $T_{s,\max}$ 、 $T_{0,\min}$ ——结构最高平均温度和结构最低初始温度。

2 对结构最大温降的工况：

$$\Delta T = T_{s,\min} - T_{0,\max} \quad (9.2.6-2)$$

式中： $T_{s,\min}$ 、 $T_{0,\max}$ ——结构最低平均温度和结构最高初始温度。

9.2.7 结构最高平均温度 $T_{s,\max}$ 和最低平均温度 $T_{s,\min}$ 应分别根据基本气温 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 确定。

1 对暴露于环境气温下的室外结构

$$T_{s,\max} = T_{\max} \quad (9.2.7-1)$$

$$T_{s,\min} = T_{\min} \quad (9.2.7-2)$$

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

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

$$T_{s,\max} = T_{s,\min} = T_{\text{avg}} \quad (9.2.7-3)$$

式中： T_{avg} ——累年平均气温。

9.2.8 结构的最高初始温度 $T_{0,\max}$ 和最低初始温度 $T_{0,\min}$ 应采用施工时可能出现的实际合拢温度，按最不利情况确定。当无法确定实际合拢日期时，可根据不同的结构工况近似取 $T_{0,\min} = 0.7T_{\min} + 0.3T_{\max}$ ， $T_{0,\max} = 0.3T_{\min} + 0.7T_{\max}$ 。

9.2.9 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作用，采用综合等效温差来计算，综合等效温差 ΔT_{st} 由式 (9.2.9) 确定。

$$\Delta T_{st} = \Delta T + \Delta T' \quad (9.2.9)$$

式中： $\Delta T'$ 、 ΔT 应分别符合本规程第 9.2.5、9.2.6 条的规定。

9.2.10 混凝土徐变的作用可采用徐变应力折减系数法近似考虑，将弹性方法分析结果乘以徐变应力折减系数，徐变应力折减系数可根据工程经验确定。

9.2.11 超长结构预应力设计可采用间接作用效应参与荷载效应组合的极限状态设计方法，也可采用建立等效预压应力的简化设计方法。

9.2.12 采用间接作用效应参与荷载效应组合的极限状态设计方法时，以综合等效温差代表的间接作用效应分类按可变荷载，参与正常使用极限状态和承载能力极限状态的荷载组合，并应符合下列规定：

1 水平构件（梁、板）进行正截面抗裂验算时，间接作用的荷载效应组合值系数可取 0.6，准永久值系数可取 0.4。间接作用的荷载效应分项系数可取为 1.0。二类环境中预应力混凝土构件正截面抗裂验算时，其裂缝控制等级可取为二级。

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

9.2.13 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应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（爆炸、撞击）等不参与组合。

9.2.14 超长结构预应力设计采用等效预压应力的简化方法时，应在框架梁、次梁或板内均匀布置直线或曲线预应力筋，经计算得到的楼板等效预压应力不宜小于 1.0MPa。

9.2.15 超长预应力结构宜采用摩擦系数较小且刚度较好的波纹管，并宜采取有效措施减小张拉阶段预应力筋与孔壁的摩阻力。超长预应力结构分段施工时，每段波纹管长度大于 50m 时，其

孔道摩阻系数宜通过现场测试确定。

9.2.16 超长结构的腰筋应通过计算确定，可考虑采用无粘结筋或普通钢筋作腰筋。

9.2.17 超长结构楼板钢筋宜采用双层双向连续布置的方式，根据计算局部增设附加受力钢筋。宜沿板厚中部均匀布置水平无粘结筋。

9.3 超长结构线型布置方法

9.3.1 在确定超长框架梁预应力筋的布索方式时，应充分考虑布索方案的可操作性和经济性。可利用无粘结预应力筋增加梁的抗裂度。

9.3.2 超长框架梁不宜采用折线形预应力筋布置，张拉端的预应力筋线型宜尽量平缓，且张拉端延长线可采用直径更大的波纹管。

9.3.3 对于跨度较小的端跨，不宜采用抛物线形预应力筋，必要时可在边跨梁底布置直线预应力筋，以平衡梁面预应力筋对边跨梁端产生的偏心弯矩。采用单端张拉时，预应力筋的张拉端宜设置在线型较为平缓的一端。

9.3.4 设计双向预应力框架时，应采用合适的预应力筋线型，尽量减少各平面交点在空间相交。

9.3.5 对于超长多跨预应力框架梁，当中间跨有效预应力值小于 $0.45f_{\text{ptk}}$ 时，可在中间跨增设无粘结预应力筋增强抗裂性能。

9.3.6 超长预应力结构宜采用摩阻系数较小且刚度较好的波纹管，并宜采取有效分段张拉、合适的预应力筋线型或施工措施等方法减小张拉阶段预应力筋与孔壁的摩阻力。

9.3.7 超长楼盖或屋盖结构中无粘结预应力筋的布置应符合下列规定：

1 楼盖或屋盖内的预应力效应宜连续，楼板中的有效预压应力宜为 $0.7\text{N/mm}^2 \sim 3.0\text{N/mm}^2$ ，预应力筋间距宜为 $200\text{mm} \sim$

1000mm。

2 施加预应力时，应考虑竖向构件的侧向约束作用。

3 设置后浇带时，后浇带封闭之前宜先对后浇带分隔的各结构段分别施加预应力。在后浇带封闭且混凝土强度达到设计要求后，方可张拉跨过后浇带的预应力筋。

4 用于减小混凝土收缩和温度作用效应的预应力筋宜兼作梁或板的受力钢筋。

9.4 超长结构构造措施

9.4.1 超长预应力结构留设施工后浇带时，每段的长度不宜大于 60m；对于水平弧梁的预应力筋，每段长度宜减小，相邻两条后浇带之间可留设施工缝。

9.4.2 超长预应力结构的后浇带封堵时间不宜小于 60 天；施工缝的留设时间不宜小于 21 天；有可靠措施时可适当放宽。

9.4.3 超长预应力结构中跨过后浇带的楼板、梁和墙体水平钢筋宜断开；当预应力筋张拉端设在后浇带处，后浇带宽度不宜小于 2m。

9.4.4 后浇带处的预应力筋可采用短筋搭接、连接器等方式连接（图 9.4.4），当后浇带的混凝土强度达到设计要求时，方可张拉预应力筋。

9.4.5 采用梁顶面锚固的方式时，预应力筋的锚固点不宜放在支座附近。预应力筋数量较多时宜采用分段锚固；锚固点的间距应计算确定。

9.4.6 超长结构不宜采用 C60 及以上的高强混凝土，封闭后浇注的混凝土宜采用补偿收缩混凝土。超长结构的整体合拢宜在较冷季节进行。

9.4.7 预应力超长结构中应配置防裂构造钢筋，防裂构造钢筋可利用原有钢筋贯通布置，也可另行设置并与原有钢筋搭接或在周边构件中锚固。防裂构造钢筋应符合下列规定：

1 梁两个侧面应沿腹板高度配置纵向构造钢筋，每侧纵向

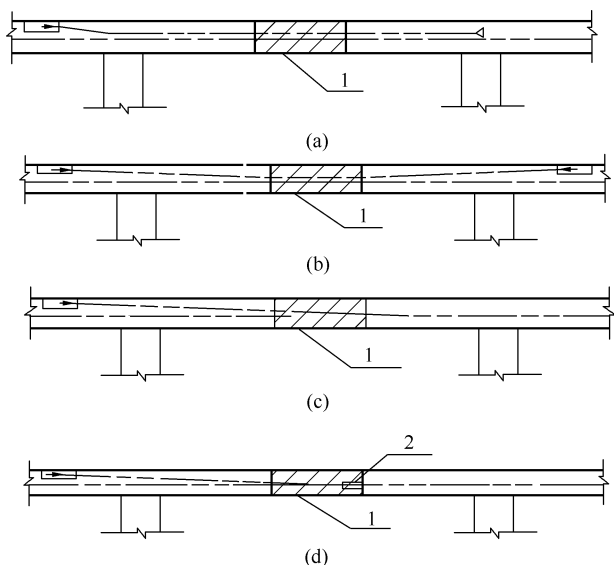


图 9.4.4 预应力筋在后浇带处的连接构造示意

1—后浇带；2—锚具式连接器

(a) 短筋搭接示意；(b) 两侧预应力筋搭接示意；(c) 单侧锚固单侧预应力筋搭接示意；(d) 双侧锚固单侧预应力筋搭接示意

构造钢筋的间距不宜大于 200mm，配筋率不宜小于 0.15%。

2 楼板的上层防裂构造钢筋应双向配置，配筋率均不宜小于 0.1%，间距不宜大于 200mm。

3 楼板平面的突变部位宜适当增加板厚或提高配筋率。

4 洞边、凹角部位及楼电梯井筒周边的楼板中宜加配防裂构造钢筋。

9.4.8 施工后浇带处的波纹管应采取措施予以保护，后浇带两侧宜设置灌浆孔。

9.4.9 超长结构在张拉预应力筋之前，不宜拆除施工临时支撑。

9.4.10 超长混凝土结构的填充墙应与框架柱、梁脱开。填充墙与框架柱、梁脱开的方法宜符合下列要求：

1 填充墙与框架柱、填充墙顶面与框架梁之间宜预留

20mm 的间隙。

2 填充墙与框架柱之间宜采用钢筋拉结。

3 填充墙长度大于 5m 或墙长大于 2 倍层高时，中间应加设构造柱；墙体高厚比大于相关规范规定或墙高度大于 4m 时宜在墙高中部设置与柱连通的水平系梁。

4 填充墙与框架柱、梁的间隙可采用聚苯乙烯泡沫板条或聚氨酯发泡充填，并用硅酮胶或其他弹性密封材料封堵。

9.4.11 无粘结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 城市道路桥梁预应力混凝土结构

10.1 一般规定

10.1.1 城市道路预应力混凝土桥梁应进行以下两类极限状态设计：

1 承载能力极限状态：结构及其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态。

2 正常使用极限状态：结构及其构件达到正常使用的某项限值的状态。

10.1.2 预应力混凝土梁桥跨径宜满足下列要求：

1 装配式预应力混凝土空心板桥的跨径不大于 20m；

2 整体现浇预应力混凝土板桥，简支时跨径不大于 20m，连续时跨径不大于 25m；

3 装配式预应力混凝土 T 梁桥的跨径不大于 50m；

4 装配式预应力混凝土组合箱梁桥的跨径不大于 40m。箱型截面梁跨径大于 100m 时，主梁宜按全预应力混凝土构件设计。

10.1.3 预应力混凝土桥梁设计应根据桥长、柱高、地基条件等因素合理分联，每联的长度应以结构合理、方便施工、有利使用为原则，在有条件的情况下应考虑景观要求和桥梁整体布局的一致性。

10.1.4 城市道路预应力混凝土桥梁宜根据需要提出使用阶段的检测、监测、维修或更换要求，并设置相应的通道、空间或装置。

10.1.5 预应力混凝土构件可根据桥梁使用和所处环境的要求，进行下列构件设计：

1 全预应力混凝土构件。此类构件在作用频遇组合下控制

的正截面受拉边缘不允许出现拉应力。

2 部分预应力混凝土构件。此类构件在作用频遇组合下控制的正截面受拉边缘可出现拉应力：当拉应力不大于规定限值时，为 A 类预应力混凝土构件；当拉应力大于规定限值时，为 B 类预应力混凝土构件。

10.1.6 计算预应力混凝土构件的弹性阶段应力时，构件截面性质可按下列规定采用：

1 先张法构件，采用换算截面。

2 后张法构件，当计算由作用和体外预应力引起的应力时，体内预应力管道压浆前采用净截面，体内预应力筋与混凝土粘结后采用换算截面；当计算由体内预应力引起的应力时，除指明者外采用净截面。

3 截面性质对计算应力或控制条件影响不大时，也可采用毛截面。

10.1.7 预应力混凝土组合式受弯构件，应按对全预应力混凝土构件、预应力混凝土 A 类构件的要求进行斜截面抗裂验算，混凝土主拉应力应考虑组合构件受力特点进行验算。

10.1.8 桥梁上部结构应对主梁、横梁、桥面板及整体结构进行各施工阶段计算。

10.1.9 纵向总体计算

1 直线桥可采用平面杆系程序分析。

2 多主梁装配式桥梁先计算横向分布系数，然后取最不利单梁进行分析。支点和跨中断面分别取不同的分布系数，分布系数变化点为 $1/4 \sim 1/5$ 计算跨径。

3 曲线桥分析有关规定：

1) 当担跨所对应的圆心角 $\varphi < 5^\circ$ 时，可作为以曲线长为跨径的直线桥进行分析。

2) 当 $5^\circ < \varphi \leq 30^\circ$ 时，弯矩及剪力可按直线桥进行分析，反力及扭矩需按空间程序进行分析，并且应考虑由于预应力、混凝土收缩、徐变及温度作用所产生的效应。

- 3) 当 $30^\circ < \varphi \leq 45^\circ$ 时, 所有截面内力均应按空间程序进行分析。
- 4) 当 $\varphi > 45^\circ$ 时, 除按空间程序分析外, 还应考虑翘曲约束扭转的影响。
- 5) 当采用具有相当抗扭刚度的闭口截面曲线梁桥, 其扭转跨径所对应的 (曲跨梁段) 圆心角小于 12° 时, 可以按直线桥进行分析。

10.1.10 预应力混凝土梁桥预应力钢筋的配置应按以下原则进行:

预应力混凝土梁截面设计计算时, 钢束面积按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行估算。当截面承受异号弯矩时, 一般需要在梁上、下缘都配置预应力筋, 此时应根据主梁上、下缘不出现拉应力或有一定压应力储备来确定。

10.1.11 预应力混凝土梁桥挠度计算及预拱度应按以下原则设置:

1 预应力混凝土受弯构件, 在正常使用极限状态下的挠度, 可根据给定的构件刚度用结构力学的方法计算。

2 预应力产生的长期反拱值大于按荷载短期效应组合计算的长期挠度时, 可不设预拱度。

3 预应力产生的长期反拱值小于按荷载短期效应组合计算的长期拱度时, 应设预拱度, 其值应按该项荷载的挠度值与预加应力长期反拱值之差采用。

10.2 构造规定

10.2.1 先张法构件中预应力筋的保护层厚度取钢筋外缘至混凝土表面的距离, 不应小于钢筋公称直径; 后张法构件中预应力筋的保护层厚度取预应力管道外缘至混凝土表面的距离, 不应小于其管道直径的 $1/2$ 。

10.2.2 当预应力混凝土梁设置竖向预应力筋时, 其纵向间距宜为 $500\text{mm} \sim 1000\text{mm}$ 。

预应力混凝土 T 形、I 形截面梁和箱形截面梁腹板内应分别设置直径不小于 10mm 和 12mm 的箍筋，且应采用带肋钢筋，间距不宜大于 200mm；自支座中心起长度不小于一倍梁高范围内，应采用闭合式箍筋，间距不应大于 120mm。

在 T 形、I 形截面梁下部的马蹄内，应另设直径不小于 8mm 的闭合式箍筋，间距不应大于 200mm。

10.2.3 部分预应力混凝土梁应采用混合配筋。位于受拉区边缘的普通钢筋宜采用直径较小的带肋钢筋，以较密的间距布置。

10.2.4 先张法预应力混凝土构件宜采用钢绞线、螺旋肋钢丝用作预应力筋。当采用光面钢丝作预应力筋时，应采取适当措施，保证钢丝在混凝土中可靠地锚固。

10.2.5 在先张法预应力混凝土构件中，预应力钢绞线之间的净距不应小于其公称直径的 1.5 倍，对于 1×7 钢绞线不应小于 25mm；预应力钢丝间净距不应小于 15mm。

10.2.6 在先张法预应力混凝土构件中，对于单根预应力筋，其端部应设置长度不小于 150mm 的螺旋筋；对于多根预应力筋，在构件端部 10 倍预应力筋直径范围内，应设置 3 片～5 片钢筋网。

10.2.7 后张法预应力混凝土构件的端部锚固区，在锚具下面应采用带喇叭管的锚垫板。锚垫板下应设间接钢筋，其体积配筋率 ρ_v 不应小于 0.5%。

10.2.8 后张法预应力混凝土构件的曲线形预应力筋的曲线半径应符合下列规定：

1 钢丝束、钢绞线束的钢丝直径等于或小于 5mm 时，不宜小于 4m；钢丝直径大于 5mm 时，不宜小于 6m。

2 预应力螺纹钢筋的直径等于或小于 25mm 时，不宜小于 12m；直径大于 25mm 时，不宜小于 15m。

10.2.9 后张法预应力混凝土构件的曲线形钢丝束、钢绞线束的锚下最小直线段长度宜取 0.80m～1.50m。

10.2.10 预应力筋管道压浆用水泥浆， $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$

试件，标准养护 28d，按《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》GB/T 17671 的规定，测得的抗压强度不应小于 50MPa。为减少收缩，可通过试验掺入适量膨胀剂。

10.2.11 在预加应力施加完毕后，埋封于梁体内的锚具其周围应设置构造钢筋与梁体连接，然后浇筑混凝土封锚。封锚混凝土强度等级不应低于构件混凝土强度等级。

10.2.12 在连续梁全长上，预应力筋不宜在某个截面或某个区段急剧增加或减少。梁的正负弯矩交替区，可设置较长的预应力筋重叠搭接段，并宜分散布置。在连续梁中间支承处，腹板及其下方翼缘内应设置顺桥向的普通钢筋。

10.2.13 当预应力筋需在构件中间锚固时，其锚固点宜设在截面重心轴附近或外荷载作用下的受压区。如因锚固而削弱梁截面，应用普通钢筋补强。当箱形截面梁的顶、底板内的预应力筋引出板外时，应在专设的齿板上锚固，此时，预应力筋宜采用较大弯曲半径，并设置箍筋。

10.2.14 节段预制拼装的预应力混凝土结构，应满足下列构造要求：

1 预制节段端部应配置直径不小于 10mm 的钢筋网。

2 预制节段接缝间宜采用胶接缝或现浇湿接缝，胶接缝可采用环氧树脂粘结，现浇湿接缝可采用细石混凝土填充。环氧树脂接缝的涂层厚度应均匀，接缝应进行挤压。细石混凝土接缝的缝宽不应小于 60mm，混凝土强度等级不应小于预制节段的混凝土强度等级。

10.2.15 后张法预应力构件的端部锚固区，应按下列要求配置普通钢筋：

1 锚下局部区应配置间接钢筋。当采用平板式锚垫板，应配置不小于 4 层的方格网钢筋或不小于 4 圈的螺旋筋；当采用带喇叭管的锚垫板，应配置螺旋筋，其圈数的长度不应小于喇叭管长度。

2 锚下总体区应配置抵抗横向劈裂力的闭合式箍筋，其间

距不应大于 120mm。

3 梁端截面应配置抵抗表面剥裂力的抗裂钢筋。当采用大偏心锚固时，锚固端面钢筋宜弯起并延伸至纵向受拉边缘。

10.2.16 体外预应力混凝土桥梁应留有供体外预应力系统维护、更换的空间和设备进出的通道。

10.2.17 体外预应力混凝土桥梁应根据施工方法、结构的设计使用年限、所处的环境类别，选定体内、体外预应力钢束的比例，选用体外预应力钢索的防腐蚀措施。

10.2.18 体外预应力筋的自由长度不宜大于 8.0m，自由段与相连接锚固段宜设置转角。

10.2.19 锚固横梁的厚度应由锚具布置深度和钢束转向所需长度决定，锚固横梁的厚度不宜小于 1000mm。锚固横梁的平面尺寸应由锚具布置尺寸、张拉空间尺寸等要求选定。

10.2.20 等高度连续梁应优先布置腹板预应力筋，尽可能少的布置顶底板较长预应力筋，以减小预应力次内力对桥梁结构的不利影响。

10.2.21 预应力筋的布置，应线型平顺符合内力分布，且应尽量避免布置受压预应力筋。梁端部位，应配置弯起锚固钢束，一般弯起锚固在梁端横隔板上；弯起锚固于桥面的钢束，应重视该处的耐久性设计细节。

10.2.22 应对纵、横竖向预应力筋、支座锚固钢筋、腹板箍筋等构造进行图纸放样，以保证预应力筋的布置合理。

10.2.23 纵向预应力筋需要平弯的，应妥善处理平弯与腹板箍筋位置重叠的问题，以避免过分削弱腹板抗剪能力。

10.2.24 预应力钢束锚固位置应尽量布置在截面厚实部分附近，并让锚固力传至截面的区段尽量短。

10.2.25 预应力混凝土梁桥体外预应力筋的转向构造，宜根据受力要求，选取块式、横肋式、竖肋式或横梁式转向块。

块式转向构造应设置内环箍筋和外环箍筋，前者围住单个转向器，后者沿转向构造围住所有转向器。

内环箍筋直径不宜小于 20mm；内环箍筋和外环箍筋沿转向器纵向布置，纵向间距不宜大于 10cm。

10.2.26 后张法预应力齿块锚固区应进行配筋计算，普通钢筋构造应满足下列要求：

1 齿块锚下应配置抵抗横向劈裂力的闭合式箍筋或 U 形箍筋，其间距不宜大于 15cm，纵向分布范围不宜小于 1.2 倍齿块高度。

2 齿块锚固面应配置齿块端面竖筋，伸入至壁板外侧。

3 壁板内边缘应配置抵抗锚后牵拉的纵向钢筋。当需要配置纵向加强钢筋时，其长度不宜小于 1.5m（以齿块锚固面与壁板交线为中心），横向分布范围宜在预应力筋轴线两侧各 1.5 倍锚垫板宽度内。

4 壁板外边缘应配置抵抗边缘局部侧弯的纵向钢筋。当需要配置纵向加强钢筋时，其长度不宜小于 1.5m（以距锚固面前方 1 倍壁板厚位置为中心），横向分布范围宜在预应力筋轴线两侧各 1.5 倍锚垫板宽度内。

5 预应力筋径向力作用区，应配置竖向箍筋及沿预应力管道的 U 形防崩钢筋，与壁板内纵筋钩接，纵向分布范围宜取曲线预应力段的全长。

10.3 施 工 要 求

10.3.1 预应力筋进场后，必须按相应国家标准的要求对其强度、外形尺寸、物理及力学性能等进行检验。锚头应按照相应行业规范要求表面裂纹及锈蚀检验，夹片应按照相应行业规范要求硬度检验，锚具应按照相应行业规范要求锚具—钢绞线组装件的锚固性能试验，同时应就实测的弹性模量和截面积对张拉引伸量进行修正。

10.3.2 考虑到管道摩阻、管道偏差系数、锚圈口损失实测值与理论值的出入，施工前应进行必要的测试工作。

10.3.3 预应力筋应保持清洁，在存放和搬运过程中应避免使其

产生机械损伤和有害的锈蚀。进场后的存放时间不宜超过 6 个月，且宜存放在干燥、防潮、通风良好、无腐蚀气体和介质的仓库内；在室外存放时，不得直接堆放在地面，应支垫并遮盖，防止雨露和各种腐蚀性介质对其产生不利影响。

10.3.4 预应力管道应按设计给定的坐标准确定位，直线段每隔一定间距设一道定位筋，曲线段适当加密。应确保锚垫板与预应力束垂直，垫板中心应对准管道中心。管道的连接必须保证质量，应杜绝因漏浆造成预应力管道堵塞。

10.3.5 后张法预应力钢束张拉，混凝土龄期不宜小于 7d，混凝土强度应不低于设计强度的 90%，混凝土弹性模量应不低于 28d 弹性模量的 90%。

10.3.6 预应力钢束张拉应严格按照设计提供的张拉顺序和张拉控制应力进行。预应力钢束均采用张拉应力与伸长量双控。伸长量误差应在 $\pm 6\%$ 以内。施工时还应考虑锚圈口摩阻损失和千斤顶的内摩阻损失，施工前应对此进行测定，张拉时予以调整。

10.3.7 应采取有效措施确保竖向预应力的有效性，如采用扭力扳手等使锚固数据信息化。如条件允许，在第一次张拉完成约两周时，进行二次复拉等。

10.3.8 预应力采用真空辅助压浆技术时，压浆浆液性能指标应符合《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 表 7.9.3 的要求，压浆前进行必要的试验，确定压浆实施规程，并由专业队伍施工。

10.3.9 预应力钢束张拉完成后，除竖向预应力在复拉后进行压浆外，纵向和横向预应力应立即进行压浆。正式压浆前，必须检查管道畅通和渗漏情况，压浆时，若从一端压不通，须及时处理。已经张拉完成并灌浆的钢束，应作严格标记并经监理认可。

10.3.10 高强钢丝的镦头宜采用液压冷镦，镦头前应确认钢丝的可镦性。钢丝镦头的强度不得小于钢丝强度标准值的 98%。

10.3.11 制作挤压锚时，模具与挤压锚应配套使用，挤压锚具的外表面应涂润滑介质，挤压力和挤压操作应符合产品使用说明

书的规定。挤压后的预应力筋外端应露出挤压套筒 2mm~5mm。钢绞线压花锚成型时，表面应清洁、无油污，梨形头的尺寸和直线段长度应不小于设计值。环氧涂层钢绞线不得用于制作压花锚。

10.3.12 预应力筋由多根钢丝或钢绞线组成且当采取整束穿入孔道内时应预先编束，编束时应将钢丝或钢绞线逐根理顺，防止缠绕，并应每隔 1m~1.5m 捆绑一次，使其绑扎牢固、顺直。

10.3.13 浇筑混凝土时，宜根据结构或构件的不同形式选用插入式、附着式或平板式等振动器进行振捣。对箱梁腹板与底板及顶板连接处的承托、预应力筋锚固区及其他预应力钢束与钢筋密集的部位，应采取有效措施加强振捣；对先张构件应避免振动器碰撞预应力筋；对后张结构应避免振动器碰撞预应力筋的管道、预埋件等。浇筑过程中应随时检查模板、管道、锚固端垫板等的稳固性，保证其位置及尺寸符合设计要求。

10.3.14 先张法预应力筋的安装宜自下而上进行，并应采取措施防止其被台座上涂刷的隔离剂污染。预应力筋与锚固横梁间的连接，宜采用张拉螺杆。

10.3.15 体外预应力外套管的安装应连接平滑且应完全密封，在安装过程中应防止外套管受到机械损伤。由多根预应力筋组成体外预应力束的外套管，其管内应采用防腐油脂保护。

10.3.16 体外预应力束的锚固区和转向块应与主体结构同时施工，预埋的锚固件及管道的位置和方向应符合设计规定。转向块的偏角制造误差应小于 1.2° ，安装误差不超过 $\pm 5\%$ ，否则应采用可调节转向块。

10.3.17 体外预应力束张拉完成后，应对其锚具设置全密封防护罩，并应在防护罩内灌注油脂或其他可清洗的防腐蚀材料。

10.4 健康监测

10.4.1 预应力混凝土梁桥结构安全监测的目的是利用不断发展的传感测试、信号分析、远程控制等新设备和新技术，结合桥梁

结构分析等技术，建立一套实时掌控桥梁的安全使用状态，辅助桥梁维护管养的自动化监测系统。

10.4.2 监测系统对以下几个方面进行监控：桥梁结构在正常环境与交通条件下运营的物理与力学状态（挠度、应力、温度）；桥梁重要非结构构件（如支座）和附属设施（如振动控制元件）的工作状态；桥梁所处环境条件（风、温度、湿度）等。

10.4.3 常用的挠度（位移）变形监测方法有导线测量（观测水平位移）、几何水准法（观测竖向位移）、GPS 测定三维位移量法、自动极坐标实时差分测量法（ATR 自动监测系统）、连通管压力测试法和光电测距（EDM）的方法。

10.4.4 应力监测的方法有埋入元件测试法和表面测试法等。埋入元件测试法：在浇筑混凝土前，将传感元件预埋在控制截面结构体内，传感器沿纵桥向布置和埋设，用铁丝捆扎在箱梁上下缘表层纵向钢筋上。表面测试法：在混凝土表面布设和安装应力监测传感器，传感器按照监测顺桥向应力布置，采用螺栓等进行传感器固定。

10.4.5 对于混凝土箱梁，截面上的温度梯度对结构应力影响较大，为提高监测精度，消除温度对监测数据的影响，对控制截面所有监测应力的测点设置温度计。温度测量应在规定的时间内按照记录表格要求做详细的温度测量记录。

10.4.6 结构动力测试的传感器有速度计、加速度计，加速度计主要包括伺服式、压电式、电容式等。传感器信号通过信号采集系统经滤波、放大、模数（A/D）转换成数字信号输入计算机进行分析。

10.4.7 环境风荷载是桥梁运营状态的主要荷载源，宜在桥梁中部位置设置风荷载监测装置，记录桥梁运营状态下风荷载的变化状况，当大桥环境风速达到一定不可接受的水平值时给出限速、封桥等预警警告。

10.4.8 监测系统一般主要由四个子系统组成：传感器子系统、数据采集和传输子系统、数据处理和控制子系统、结构安全评估

子系统。

传感器子系统，主要功能是通过安装在桥上的传感器采集各类监测信号。

数据采集和传输子系统，主要功能将采集到的电信号和光信号转换成数据信号并通过光纤网络输送到监控中心的数据处理和控制子系统。

数据处理和控制子系统，主要功能是由计算机系统完成数据的预处理、后处理、归档、显示和存储等数据管理，并通过光纤网络控制外场的各数据采集站和传感测试设备的工作。

结构安全评估子系统，主要功能是展示桥梁的实际工作状态信息，进行结构运营状态预警分析和显示，利用各种结构静动态分析软件完成结构的安全使用状况的评估工作，定期编制并提交监测报告给桥梁养护管理维修部门，为桥梁构件的维修、维护工作提供技术支持。

此外系统还包括用户界面子系统、数据库子系统等辅助部分。

11 预应力混凝土结构主要构造规定

11.1 一般规定

11.1.1 预应力结构构件应根据结构类型及构件部位选择采用有粘结、缓粘结或无粘结预应力。对于主要承重构件和抵抗地震作用的构件（框架梁、门架、转换层大梁等）宜采用有粘结或缓粘结预应力，对于板类构件、扁梁和次梁宜采用无粘结预应力。

11.1.2 预应力混凝土梁中箍筋的构造措施应符合《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

11.1.3 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 。
- 2 设计使用年限为 50 年的混凝土结构，最外层受力筋的保护层厚度应符合表 11.1.3 的规定；设计使用年限为 100 年的混凝土结构，最外层受力筋的保护层厚度不应小于表 11.1.3 中数值的 1.4 倍。

表 11.1.3 混凝土保护层最小厚度（mm）

环境类别	板、墙、壳	梁、柱、杆
一	15	20
二 a	20	25
二 b	25	35
三 a	30	40
三 b	40	50

11.1.4 当预应力梁、板有防火要求时，应根据耐火极限的要求确定混凝土保护层厚度符合表 11.1.4-1 与表 11.1.4-2 规定的限值：

表 11.1.4-1 板的预应力钢筋混凝土保护层最小厚度 (mm)

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

表 11.1.4-2 梁的预应力钢筋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	采取特殊措施
简支	≥ 300	40	45	50	65
连续	$200 \leq b < 300$	40	40	45	50
连续	≥ 300	40	40	40	45

注：如耐火等级较高，当混凝土保护层厚度不能满足表列要求时，应使用防火涂料

11.1.5 预应力构件截面尺寸的确定，除考虑结构荷载、建筑净高等条件外，还应考虑预应力束及锚具的布置、张拉施工操作距离等影响因素。

11.2 先张法构件

11.2.1 先张预应力混凝土构件宜采用有螺纹的预应力筋。当采用光面钢丝作预应力筋时，应采取适当措施，保证钢丝在混凝土中可靠地锚固，防止钢丝与混凝土粘结力不足而造成钢丝滑动。

受拉预应力筋的锚固长度应按下列公式计算：

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_{py}}{f_t} d \tag{11.2.1}$$

式中： l_{ab} ——受拉预应力筋的锚固长度；
 f_{py} ——预应力筋的抗拉强度设计值；
 f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值：当混凝土强度等级大于 C60 时，按 C60 取用；

α ——钢筋的外形系数，按表 7.3.8 取用。

11.2.2 先张法预应力钢丝可采用相同直径钢丝并筋的配筋方式。并筋的等效直径，对双并筋应取为单筋直径的 1.41 倍，对三并筋应取为单筋直径的 1.73 倍。并筋的保护层厚度、锚固长度、预应力传递长度及正常使用极限状态验算均应按等效直径考虑。

注：当预应力钢绞线采用并筋方式时，应有可靠的构造措施。

11.2.3 预应力筋之间的净距离不应小于其公称直径或等效直径的 2.5 倍和混凝土粗骨料最大粒径的 1.25 倍，且应符合下列规定：对预应力钢丝，不应小于 15mm；对三股钢绞线，不应小于 20mm；对七股钢绞线，不应小于 25mm。当混凝土振捣密实性具有可靠保证时，净间距可放宽至最大粗骨料粒径的 1.0 倍。

11.2.4 对先张法预应力混凝土构件，预应力筋端部周围的混凝土应采取下列加强措施：

1 单根配置的预应力筋，其端部宜设置长度不小于 150mm 且不小于 4 圈的螺旋筋。当有可靠经验时，亦可利用支座垫板上的插筋代替螺旋筋，插筋数量不应小于 4 根，其长度不宜小于 120mm。

2 分散布置的多根预应力筋，在构件端部 $10d$ (d 为预应力筋的公称直径) 且不小于 100mm 长度范围内，应设置 3 片~5 片与预应力筋垂直的钢筋网。

3 采用预应力钢丝配筋的薄板，在板端 100mm 范围内应适当加密横向钢筋网。

4 槽形板类构件，应在构件端部 100mm 长度范围内沿构件板面设置附加横向钢筋，其数量不应小于 2 根。

11.2.5 当采用先张法长线台生产有端横肋的预应力混凝土肋形板时，应采取有效的构造措施防止放张预应力时端横肋产生裂缝。

11.2.6 对预应力筋在构件端部全部弯起的受弯构件或直线配筋的先张法构件，当构件端部与下部支承结构焊接时，应考虑混凝

土收缩、徐变及温度变化所产生的不利影响，宜在构件端部可能产生裂缝的部位设置足够的非预应力纵向构造钢筋。

11.2.7 在先张法预应力混凝土构件中，预应力筋或埋入式锚具与构件表面之间的保护层厚度宜按本规程第 11.1.3、11.1.4 条取值。预应力钢丝束与埋入式锚具之间的净距不应小于 20mm。

11.3 后张法构件

11.3.1 后张法预应力筋所用锚具、夹具和连接器等形式和质量应符合国家现行有关标准的规定。

11.3.2 对后张法预应力构件端部截面，宜在靠近支座部分将一部分预应力筋弯起，且沿构件端部均匀布置。同时，可将锚固区段内的构件截面加宽，并设置沿梁高方向的焊接钢筋网、封闭式箍筋或其他形式的构造钢筋。简支梁端部局部承压区内的箍筋不小于 $\varphi 8@100$ 。

11.3.3 T形或 I形截面的受弯构件，当腹板内有竖向预应力筋时，腹板高度不应大于腹板厚度的 20 倍；当无竖向预应力筋时，腹板高度不应大于腹板厚度的 15 倍。腹板厚度不应小于 140mm。

11.3.4 预应力钢丝束、钢绞线束的预留孔道应符合下列规定：

1 对预制构件，孔道之间的水平净距不宜小于 50mm，且不宜小于粗骨料粒径的 1.25 倍；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 在框架梁中，预留孔道竖向的净距不应小于孔道直径，水平方向的净距不宜小于 1.5 倍孔道直径，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 从孔壁算起的混凝土保护层厚度，梁底不宜小于 50mm，梁侧不宜小于 40mm，板底不宜小于 25mm，裂缝控制等级三级的梁底、梁侧分别不宜小于 60mm 和 50mm。

4 预留孔道的内径应比预应力钢丝束或钢绞线束外径或需穿过孔道的连接器外径大 6mm~15mm；且孔道的截面积宜为穿

入预应力束截面积的 3.0 倍~4.0 倍。

5 当有可靠经验并保证混凝土浇筑质量时,预留孔道可水平并列贴紧布置,并排的数量不应大于 2 束。

6 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。

7 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。相邻锚具的中心距离应大于锚具下的承压钢板尺寸加 20mm;锚具中心至构件边缘距离应大于锚具下承压钢板边缘加 40mm。

11.3.5 后张预应力混凝土构件的曲线预应力筋曲率半径 r_p 宜按公式 (11.3.5) 确定,孔径 50mm~70mm 的不宜小于 4m,孔径 75mm~95mm 的不宜小于 5m。

$$r_p \geq \frac{P}{0.35f_c d_p} \quad (11.3.5)$$

式中: P ——预应力束的合力设计值:对有粘结预应力混凝土取 1.2 倍张拉控制力;对于无粘结预应力混凝土构件取 1.2 倍张拉控制力和 $f_{ptk}A_p$ 中的较大值;

r_p ——预应力束的曲率半径 (m);

d_p ——预应力束孔道的外径;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值,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《混凝土结构设计规范》GB 50010 的表 4.1.4-1 以线性内插法确定。

对于折线配筋的构件,在预应力束弯折处的曲率半径可适当减小。当曲率半径 r_p 不满足上述要求时,可在曲线预应力束弯折处内侧设置钢筋网片或螺旋筋。

曲线预应力(钢)筋的端头,应有与之相切的直线段,直线段长度不应小于 300mm。

11.3.6 后张预应力筋孔道两端应设排气孔。单跨梁的灌浆孔宜

设置在跨中处，多跨连续梁的灌浆孔宜设置在中支座处，灌浆孔间距不宜大于 12m。曲线孔道高差大于 0.5m 时，应在孔道的每个峰顶处设置泌水管，泌水管伸出梁面高度不宜小于 0.5m。泌水管也可兼作灌浆管使用。

11.3.7 预应力筋固定端可利用挤压锚具或压花锚具，采取内埋式做法，其埋设位置应超出支座梁或柱的中心线，并宜错开 300mm，距梁柱侧面边缘不小于 40mm。

11.3.8 锚具后面的间接钢筋可采用钢筋网片、附加箍筋或螺旋筋，钢筋直径不小于 $\phi 10\text{mm}$ 。钢筋网片尺寸不宜小于承压钢板尺寸，且不少于 4 片；螺旋筋的环绕直径不宜小于承压钢板的边长，且不少于 4 圈。

11.3.9 外露金属锚具应采取可靠的防腐措施。

11.3.10 采用梁端部加宽或梁端局部加腋锚固时，应在梁加宽长度范围或加腋处预应力筋水平弯折范围内加配防崩钢筋。

11.3.11 预应力筋布置不应沿连续梁全长急剧增加或减少。在荷载作用下的梁正负弯矩交替处，预应力筋宜分散布置在梁的上下翼缘附近。当预应力筋锚固于梁的跨间时，锚具应布置在可变荷载作用下内力变化不明显的区域，锚具在截面中的位置应尽量位于截面形心处，因锚具而削弱的构件截面，必要时应采取普通钢筋加强或其他措施补强。

11.3.12 对于埋置在混凝土构件内的锚具，在预应力张拉完成后，应先在其周围配置钢筋网，然后浇筑混凝土。

11.3.13 预应力混凝土连续梁在选用预应力体系和布置预应力筋时，可采用下列措施以减小摩擦损失：

1 当需要在整根梁上布置通长曲线形预应力筋时，可结合梁的受力情况变化及梁高，宜尽量平缓布置。

2 为避免一根预应力筋形成几个 S 形曲线，可在预应力筋反弯段处设置较长的钢筋重叠段。

11.3.14 箱形截面的预应力混凝土梁，顶板与腹板相交处应设置承托。预应力筋的齿板可设置在承托内。

顶板内无预应力主筋区段，在顺桥向可设置配筋率不小于 0.25%~0.30% 的构造钢筋；在横向可设置包括计算钢筋在内的配筋率不小于 0.25%~0.30% 的钢筋。

11.3.15 在预应力混凝土结构中，当沿构件凹面布置曲线预应力束时（图 11.3.15），应进行防崩裂设计。当曲率半径 r_p 满足以下公式要求时，可仅配置构造 U 形插筋。

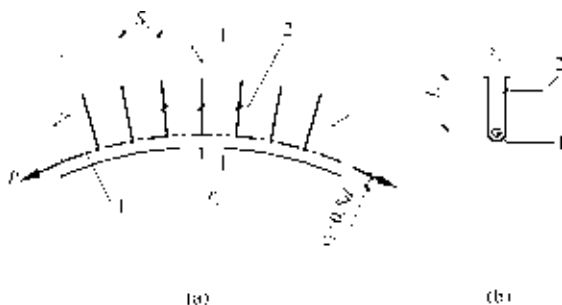


图 11.3.15 抗崩裂 U 形插筋构造示意

(a) 抗崩裂 U 形插筋布置；(b) I—I 剖面

1—预应力束；2—沿曲线预应力束均匀布置的 U 形插筋

$$r_p \geq \frac{P}{f_t(0.5d_p + c_p)} \quad (11.3.15-1)$$

当不满足时，每单肢 U 形插筋的截面面积应按下列公式确定：

$$A_{svl} \geq \frac{Ps_v}{2r_p f_{yv}} \quad (11.3.15-2)$$

式中： P ——预应力束的合力设计值，可按本规程第 11.3.5 条的规定确定；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值；或与施工张拉阶段混凝土立方体抗压强度 f'_{cu} 相应的抗拉强度设计值 f'_t ，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的表 4.1.4-2 以线性内插法确定；

c_p ——预应力束孔道净混凝土保护层厚度；

A_{svl} ——每单肢插筋截面面积；

s_v ——U形插筋间距；

f_{yv} ——U形插筋抗拉强度设计值，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的表 4.2.3-1 采用，当大于 360N/mm^2 时取 360N/mm^2 。

11.4 无粘结预应力构件

11.4.1 无粘结预应力筋锚具的选用，应根据无粘结预应力筋的种类、张拉力值及工程应用的环境类别选定。对常用的单根钢绞线无粘结预应力筋，张拉端宜采用圆套筒式或垫板连体式夹片锚具；埋入式固定端宜采用挤压锚具或经预紧的垫板连体式夹片锚具。

注：夹片锚具的夹片、锚环及连体锚具所采用的材料由预应力锚具体确定，但均应符合相关标准的规定。

11.4.2 单根无粘结预应力筋在构件端面上的水平和竖向排列最小间距不宜小于 60mm。

11.4.3 无粘结预应力混凝土受弯构件受拉区非预应力纵向受力钢筋的配置，应符合下列规定：

1 单向板非预应力纵向受力钢筋的截面面积 A_s 应按下式计算：

$$A_s \geq 0.002bh \quad (11.4.3-1)$$

式中： b ——截面宽度；

h ——截面高度。

且非预应力纵向受力钢筋直径不应小于 8mm，间距不应大于 200mm。

注：当空心板截面换算为 I 形截面计算时，配筋率应按全截面面积扣除受压翼缘面积 $(b'_f - b)h'_f$ 后的截面面积计算。

2 梁中受拉区配置的非预应力纵向受力钢筋的最小截面面积 A_s 应符合下列规定：

$$\frac{f_y A_s h_s}{f_y A_s h_s + \sigma_{pu} A_p h_p} \geq 0.25 \quad (11.4.3-2)$$

或 $A_s \geq 0.003bh$ (11.4.3-3)

取以上两式计算结果的较大者。钢筋直径不应小于 14mm。

按式 (11.4.3-2)、式 (11.4.3-3) 要求的非预应力纵向受力钢筋, 应均匀分布在梁的受拉区, 并靠近受拉混凝土边缘。非预应力纵向受力钢筋长度应符合有关规范锚固长度或延伸长度的要求。

11.4.4 无粘结预应力楼板中单根无粘结预应力筋的张拉端, 宜采用凹入式做法。承压钢板的尺寸宜为 $80\text{mm} \times 80\text{mm} \times 12\text{mm}$, 承压钢板边缘距混凝土表面不宜小于 30mm, 螺旋筋宜采用直径 6mm 的光圆钢筋, 间距不宜小于 70mm, 且不少于 4 圈。螺旋筋可直接点焊在承压钢板上。

11.4.5 梁中集束布置的预应力筋宜在张拉端分散为单根布置, 其间距宜为 60mm~70mm。

11.4.6 无粘结预应力筋固定端宜采用内埋式挤压锚具做法。

11.4.7 被孔洞阻断的板内无粘结预应力筋可分两侧绕过洞口铺设, 其离洞口的距离不应小于 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; 当洞口较大时, 应符合本规程 11.4.9 条的规定。

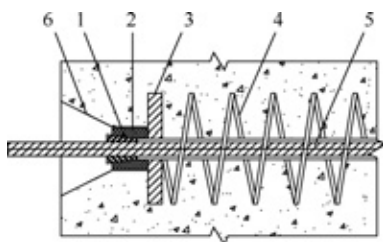
11.4.8 对无粘结预应力混凝土单向多跨连续板, 在设计中宜将无粘结预应力筋分段锚固, 或增设中间锚固点。

11.4.9 当楼盖因设楼、电梯间开洞较大, 且在板边需截断无粘结预应力筋或截面密肋板的肋时, 应沿洞口设置边梁或加强带, 以补足被孔洞削弱的板或肋的承载力和截面刚度。

11.5 缓粘结预应力构件

11.5.1 张拉端的夹片锚具宜采用凹进混凝土表面布置(图 11.5.1)。当采用凸出混凝土表面布置时, 应符合本规程第 11.5.8 条的有关规定。

11.5.2 固定端埋设在构件的混凝土中时, 挤压锚具应将套筒等



张拉端张拉完状态

图 11.5.1 张拉端锚固系统构造

1—夹片；2—锚环；3—承压板；4—螺旋筋；
5—缓粘结预应力筋；6—穴模

组装在钢绞线端部经专用设备挤压而成，挤压锚具与承压板的连接应牢固（图 11.5.2）。

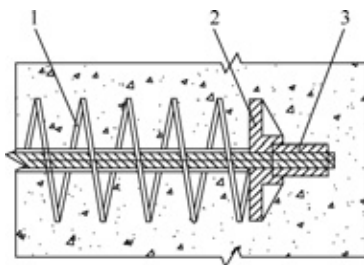


图 11.5.2 固定端锚固系统构造

1—螺旋筋；2—承压板；3—挤压锚具

11.5.3 对夹片锚具系统，单根缓粘结预应力筋在构件端面上的水平和竖向排列最小间距不宜小于 80mm。

11.5.4 缓粘结预应力筋露出锚具部分应做好密封。

11.5.5 在缓粘结预应力所用的混凝土中不得掺用氯盐。混凝土中氯离子总含量不得大于 0.06% 的水泥用量。

11.5.6 在预应力筋全长上及锚具与连接套管的连接部位，外包材料应连续、封闭且能防水。在一类、二类及三类环境条件下，锚固区的保护措施应符合本规程第 11.5.7 条及 11.5.8 条的有关

规定；对于处于二类、三类环境条件下的缓粘结预应力锚固系统，尚应符合本规程第 11.5.9 条的规定。

11.5.7 缓粘结预应力筋张拉完毕后，应及时对锚固区进行保护。当锚具采用凹进混凝土表面布置时，宜先切除外露缓粘结预应力筋的多余长度。在夹片及缓粘结预应力筋端头外露部分应涂专用防腐油脂或环氧树脂，并设防护帽封闭，防护帽与锚具应可靠连接。应采用后浇微膨胀混凝土或专用密封砂浆对锚固区进行封闭防护。

11.5.8 锚固区也可采用后浇的钢筋混凝土外包圈梁进行封闭，但外包圈梁不宜突出在外墙面以外。当锚具凸出混凝土表面布置时，锚具的混凝土保护层厚度不应小于 50mm；外露预应力筋的混凝土保护层厚度应满足以下要求：处于一类室内正常环境时，不应小于 30mm；处于二类、三类易受腐蚀环境时，不应小于 50mm。

对不能使用混凝土或砂浆封闭保护的部位，锚具应全部涂以防腐油脂，并采用具有可靠防腐和防火性能的保护罩将锚具全部封闭。

11.5.9 对处于二类、三类环境条件下的缓粘结预应力锚固系统，应采用连续封闭的防腐蚀体系，并符合下列规定：

- 1 锚固端应为预应力钢材提供全封闭防水设计；
- 2 缓粘结预应力筋与锚具部件的连接及其他部件的连接，应采用密封装置或采取封闭措施，使缓粘结预应力锚固系统处于全封闭保护状态；
- 3 连接部位在 10kPa 静水压力下应保持不透水；
- 4 如设计对缓粘结预应力筋与锚具系统有电绝缘防腐要求，可采用塑料等绝缘材料对锚具系统进行表面处理，以形成整体电绝缘。

11.5.10 预应力混凝土梁中缓粘结预应力筋的布置应符合下列规定：

- 1 缓粘结预应力筋应分束布置，每束钢绞线根数不宜大于

5 根。

2 混凝土梁中预应力束的竖向净间距不应小于缓粘结预应力筋几何直径的 1.5 倍，水平方向的净间距不应小于缓粘结几何直径的 2 倍，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 成束布置的缓粘结预应力筋在端部宜分散并单根锚固，分散后的预应力筋在构件端面上的水平和竖向排列最小间距不宜小于 80mm。构件端部尺寸应考虑锚具位置、张拉设备的尺寸和局部承压的要求，必要时应适当加大。

4 裂缝控制等级为一、二级的梁，预应力束外边缘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。

5 凡制作时需要预先起拱的构件，预应力束曲线宜随构件同时起拱。

12 预应力混凝土结构施工

12.1 一般规定

12.1.1 预应力工程的施工应由具备预应力工程施工能力和管理能力的企业承担。

12.1.2 预应力混凝土结构施工前，预应力专业施工单位应根据设计图纸与现场施工条件，编制预应力专项施工方案。

施工单位完成的预应力深化设计文件应经原设计单位审核并确认。

12.1.3 预应力工程深化设计应包括：

1 预应力筋线型坐标定位。

2 张拉端和锚固端的锚固构造、预应力钢筋和非预应力钢筋的布置及构造详图。

3 张拉、运输及安装等施工阶段进行承载能力极限状态验算和截面应力验算。

4 局部加强构造大样。

5 灌浆孔、排气孔、泌水孔设置及成孔管道的连接构造图。

6 需要深化设计的其他内容。

12.1.4 预应力工程材料应按设计要求选用，并及时进场复验和按规定要求存放。

12.1.5 合理配置预应力工程施工机具，其规格和数量应满足施工要求，张拉设备应在规定标定期限内使用。

12.1.6 预应力筋施工应进行下列计算：

1 预应力筋下料长度计算。

2 预应力筋张拉力及油泵压力相应的计算。

3 预应力筋张拉伸长值计算。

12.1.7 预应力混凝土分项工程的专项施工方案包括：

- 1 工程概况、施工顺序、工艺流程。
- 2 预应力施工方法，包括预应力筋制作、孔道预留、预应力筋安装、预应力筋张拉、孔道灌浆和封锚等。
- 3 材料采购和检验、机械配备和张拉设备标定。
- 4 施工进度和劳动力安排、材料供应计划。
- 5 有关工序（模板、钢筋、混凝土等）的配合要求。
- 6 施工质量要求和质量保证措施。
- 7 施工安全要求和安全保证措施。
- 8 施工现场管理机构。

12.1.8 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，宜为梁、板跨度的 $1/1000 \sim 3/1000$ 。

12.2 预应力筋的制作与铺设

12.2.1 预应力筋的下料长度应通过计算确定。计算时应综合考虑其孔道长度、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。

当采用钢丝束镦头锚具时，同束中各根钢丝下料长度的相对差值，不应大于钢丝长度的 $1/5000$ ，且不得大于 5mm；当长度小于 10m 的钢丝成组张拉时，下料长度的相对差值不得大于 2mm。

12.2.2 预应力筋制作或组装时，不应采用加热、焊接或电焊切割，且施工过程中应避免电火花或电流损伤预应力筋。

钢绞线挤压锚具应采用配套的挤压机制作，并应符合使用说明书的规定。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。

12.2.3 钢绞线压花锚具应采用专用的压花机制作成型，梨形头和直线锚固段长度不应小于设计值，且其表面应无污物。

采用钢丝束镦头锚具时，应确认该批预应力钢丝的可镦性。钢丝镦头的头型直径应为钢丝直径的 1.4 倍～1.5 倍，高度应为

钢丝直径的 0.95 倍~1.05 倍。钢丝镦头的强度应不小于钢丝母材强度标准值的 98%。

钢丝编束、张拉端镦头锚具安装和钢丝镦头宜同时进行。

12.2.4 预应力筋由多根钢丝或钢绞线组成时，应预先梳编成束整束穿入孔道。编束时应逐根理顺钢丝或钢绞线，并设置定位格栅或每隔 1m~1.5m 捆扎一道。

制作好的钢绞线束应有防护措施，按规格、型号、长度编号挂牌，室外存放时，须采取垫枕木，放置于干燥处，并采用油布覆盖等有效措施，防止日晒雨淋；室内存放时，应干燥、防潮、通风良好，无腐蚀性气体和介质。需装车运输的可卷成内径不小于 2.0m 的圆盘。

制作好的钢绞线束应及时穿入孔道内。

12.2.5 预应力筋或成孔管道应固定牢固，定位钢筋直径不宜小于 10mm，间距不宜大于 1.2m，板中无粘结预应力筋的定位间距可适当放宽，扁形管道、塑料波纹管或预应力筋曲线曲率较大处的定位间距宜适当缩小。

12.2.6 预应力孔道或无粘结预应力筋应铺设平顺，孔道接头应密封良好且不得漏浆。端部锚垫板的承压面应与预应力筋或孔道曲线末端的切线垂直，内埋式固定端锚垫板不应重叠，锚具与锚垫板应贴紧。

无粘结预应力筋固定端制作时，应除去锚固部分的塑料护套层与油脂。护套端部应用水密性胶带或热收缩塑料密封。

12.2.7 预应力筋孔道的灌浆孔宜设置在端部的锚垫板上。灌浆孔的间距：对预埋金属波纹管不宜大于 30m，对抽芯成形孔道不宜大于 12m。在曲线孔道的曲线波峰部位应设置排气兼泌水管，必要时可在最低点设置排水孔。

12.2.8 建筑工程预应力筋束形（孔道）控制点的竖向位置偏差应符合表 12.2.8-1 的规定；桥梁工程预应力管道安装的允许偏差应符合表 12.2.8-2 的规定。竖向位置偏差合格率应达 90% 及以上，且竖向偏差的最大值不应超出表中规定数值的 1.5 倍。

表 12.2.8-1 建筑工程预应力筋束形安装允许偏差

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

表 12.2.8-2 桥梁工程预应力管道安装允许偏差 (mm)

项目		允许偏差 (mm)
管道坐标	梁长方向	± 30
	梁高方向	± 10
管道间距	同排	± 10
	上下层	± 10

12.2.9 有粘结后张预应力结构采用先穿法安装时, 预应力筋应采取防锈蚀措施。混凝土浇筑初凝前, 宜抽动孔道内的预应力筋, 判断孔道内是否漏浆, 若出现漏浆, 应及时处理。

12.3 混凝土浇筑

12.3.1 混凝土浇筑前, 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, 并进行隐蔽工程验收, 当确认合格后方可浇筑混凝土。

12.3.2 混凝土浇筑应符合下列规定:

1 宜根据结构或构件的不同形式选用插入式、附着式或平板式等振动器进行振捣。

2 对于先张法结构构件, 应避免振动器碰撞预应力筋; 对于后张法结构构件, 应避免振动器直接接触预埋波纹管、无粘结、缓粘结预应力筋和锚具预埋件等。

3 对箱梁腹板与底板及顶板连接处的托板、预应力张拉端、固定端以及其他预应力钢束与钢筋密集的部位, 应采取有效措施加强振捣, 保证混凝土浇筑密实。

4 对无粘结或缓粘结预应力混凝土板, 浇筑过程中不应踩

踏预应力筋、定位支架钢筋以及锚固端预埋件等。

5 混凝土浇筑时，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，如有松动、变形、移位或孔道漏浆的情况应及时整修。

12.3.3 混凝土浇筑时，应留置与预应力构件同条件进行养护的试块，作为张拉或放张时混凝土强度确认的依据。

12.3.4 混凝土浇筑后应及时进行养护，养护时间以及养护方法应符合相关规范的规定。

12.3.5 混凝土强度达到 1.2MPa 前，不得在其上踩踏、堆放物料、安装模板及支架。

12.3.6 后张法预应力混凝土结构的侧模宜在张拉前拆除，且拆除时的混凝土强度应能保证其表面及棱角不受损坏。预应力混凝土结构的底模及其支撑应在预应力筋张拉完成且孔道灌浆强度达到设计要求后拆除。当设计未规定时，应在预应力张拉完成且灌浆强度达到 15MPa 后拆除。

12.3.7 预应力混凝土中氯离子含量不应大于水泥重量的 0.06%，且不应使用含氯离子的外加剂。

12.3.8 施工缝和后浇带的施工应符合下列要求：

1 预应力混凝土中的施工缝宜与预应力筋轴线垂直。

2 通过后浇带的预应力筋可采用连接器连接、两端预应力筋交叉搭接或加设附加预应力筋的连接方式。

3 后浇带封闭前，应采取对后浇带处外露预应力筋的保护措施。

4 后浇带的混凝土强度等级宜提高一级。

5 后浇带处的模板支撑，应待后浇混凝土浇筑、强度满足设计要求后拆除。

12.4 张 拉

12.4.1 张拉机具应与锚具配套使用，进场时进行检查和标定。千斤顶与压力表应配套标定，以确定张拉力与压力表读数之间的

关系曲线。所用压力表的精度不宜小于 1.5 级；标定千斤顶用的试验机或测力计的测力示值不确定度不应大于 0.5%。标定时千斤顶活塞的运行方向，应与实际张拉工作状态一致。

张拉机具应有专人使用和管理，并应经常维护，定期标定。张拉机具的标定期限不应大于半年，当张拉机具出现不正常现象时或千斤顶检修后应重新标定。

当现场设备和技术等条件具备时，宜优先采用智能张拉工艺和方法。

12.4.2 后张法张拉时和先张法放张时的混凝土强度须符合设计规定；设计未规定时，不得小于设计采用的混凝土强度等级的 75%。在未测定混凝土弹性模量时，现浇混凝土结构施加预应力时的龄期：对后张预应力混凝土板不宜小于 5d，对后张预应力混凝土梁不宜小于 7d。

在建筑工程中，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。

12.4.3 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，检查锚垫板后的混凝土密实性，同时应清理预应力筋表面的浮锈和渣土。

12.4.4 安装张拉设备时，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。

12.4.5 预应力筋的张拉控制应力应符合设计要求。施工中如需超张拉或计入锚口损失，可比设计规定提高 5%，但其最大张拉控制应力不得大于表 12.4.5 的规定：

表 12.4.5 最大张拉控制应力允许值

钢种	先张法	后张法
中强度预应力钢丝	$0.70f_{ptk}$	$0.70f_{ptk}$
预应力螺纹钢筋	$0.85f_{ptk}$	$0.85f_{ptk}$
消除应力钢丝、钢绞线	$0.75f_{ptk}$	$0.75f_{ptk}$

12.4.6 预应力筋用应力控制法张拉时，应以伸长值进行校核。实测伸长值与计算伸长值相对偏差不应大于 $\pm 6\%$ ，否则应暂停张拉，待查明原因并采取措施予以调整后，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力。

12.4.7 后张预应力筋的计算伸长值 Δl 可按下式计算：

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{A_p \cdot E_s} \quad (12.4.7-1)$$

$$P = P_j \left(\frac{1 + e^{-\langle kx + t\theta \rangle}}{2} \right) \quad (12.4.7-2)$$

式中： P ——预应力筋平均张拉力，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 ——预应力筋的实际长度。

12.4.8 对多曲线段或直线段与曲线段组成的预应力筋，张拉伸长值应分段计算后叠加：

$$\Delta l = \sum \frac{(\sigma_{i1} + \sigma_{i2}) l_i}{2E_s} \quad (12.4.8)$$

式中： l_i ——第 i 段预应力筋的长度；

σ_{i1} 、 σ_{i2} ——分别为第 i 段两端预应力筋的应力。

12.4.9 后张预应力筋的实测伸长值在初应力 σ_0 时开始量测，初应力 σ_0 一般可取张拉控制应力的 $10\% \sim 25\%$ 。对多波曲线或超长预应力筋，初应力 σ_0 宜取张拉控制应力的 $20\% \sim 30\%$ 。实测伸长值 Δl_0 可按下式确定，并须分级记录：

$$\Delta l_0 = \Delta l_1 + \Delta l_2 - \Delta l_3 - \Delta l_4 - \Delta l_5 \quad (12.4.9)$$

式中： Δl_1 ——从初应力 σ_0 至最大张拉力应力间的实测伸长值；

Δl_2 ——初应力以下的推算伸长值，可根据张拉力与伸长值成正比关系确定；

Δl_3 ——张拉过程中构件的弹性压缩值；

Δl_4 ——千斤顶内的预应力筋张拉伸长值；

Δl_5 ——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量。

12.4.10 预应力筋的张拉程序，应符合设计要求；当设计未规定时，可按下列程序张拉：

1 当不需超张拉时，预应力筋的张拉程序为：

0→初应力→2 倍初应力→ σ_{con} （持荷 2min~5min 锚固）

2 当采用超张拉方法减少预应力损失时，预应力筋的张拉程序为：

1) 对于可调节式锚具

0→初应力→2 倍初应力→ $1.05\sigma_{\text{con}}$ （持荷 2min ~ 5min）→ σ_{con} （锚固）

2) 对于不可调节式锚具

0→初应力→2 倍初应力→ $1.03\sigma_{\text{con}}$ （持荷 2min~5min 锚固）

12.4.11 预应力筋张拉锚固后实际建立的预应力值与设计规定检验值的相对偏差不应大于 $\pm 5\%$ 。

12.4.12 预应力筋张拉过程中应避免断裂或滑脱。对后张法预应力结构构件，预应力筋断丝或滑丝的数量不应大于表 12.4.12 的规定；对先张法预应力构件，在浇筑混凝土前发生断裂或滑脱的预应力筋必须予以更换。

表 12.4.12 预应力筋断丝、滑丝限值

预应力筋类别	检查项目	控制数量	
		建筑工程	桥梁工程
钢丝	每个截面断丝之和不大于该截面 钢丝总数的百分比断丝或滑比	3%	1%
钢绞线	断丝	1 丝	
螺纹钢筋	断筋或滑移	不允许	

注：1 钢绞线断丝系指单根钢绞线内钢丝的断丝，钢绞线钢丝数量等于钢绞线根数与每根钢绞线钢丝数量的乘积；

2 对预应力混凝土板，其截面宽度应按每跨计算。

12.4.13 预应力筋的张拉顺序应符合设计要求。当设计中无具体要求时，可根据结构受力特点、施工方便、操作安全等因素

确定。

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。对平卧叠浇屋架等预制构件，应从上而下逐榀张拉。当预制构件叠层较多时，应考虑上下层的粘结影响。

当预应力筋采取逐根张拉或逐束张拉时，应保证各阶段不出现对结构不利的应力状态，同时宜考虑后批张拉的预应力筋产生的弹性压缩对先批张拉预应力筋的影响。

12.4.14 预应力筋的张拉方法，应根据设计和施工计算要求采用一端张拉或两端张拉。采用两端张拉时，宜两端同时对称张拉，也可一端先张拉，另端补张拉。

预应力筋张拉或放张时，应采取有效的安全防护措施，预应力筋两端正前方不得站人或穿越。

12.4.15 对同一束预应力筋，应采用相应吨位的千斤顶整束张拉。对直线束或平行排放的单波曲线束，如整束张拉有困难，也可采用单根张拉工艺，但应考虑其相互影响。

12.4.16 对于桥梁工程及有较高要求的预应力工程宜采用数控张拉。数控张拉相关规定可参照附录 D。

12.4.17 预应力筋张拉时，应对张拉力、压力表读数、张拉伸长值、异常现象等作出详细记录。张拉记录表格可参照附录 F。

12.5 灌 浆

12.5.1 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。

灌浆设备的配备必须满足连续工作的要求，应根据灌浆高度、孔道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和流量计。灌浆前应检查灌浆设备、输浆管和阀门的可靠性。

12.5.2 灌浆前对锚具夹片空隙和其他可能漏浆处需采用高标号

水泥浆或结构胶等方法封堵，待封堵材料达到一定强度后方可灌浆。

采用真空辅助灌浆时，应先将张拉端多余钢绞线切除，并用无收缩砂浆或专用灌浆密封罩将端部封闭。

12.5.3 后张法预应力筋张拉完成并经检查合格后，孔道应尽早灌浆，一般不宜大于 48h。灌浆后孔道内应饱满、密实。

12.5.4 孔道宜优先采用专用成品灌浆料或专用压浆剂配置的浆体进行灌浆。当采用普通硅酸盐水泥拌制的浆体时，宜掺入适量的外加剂，且灌浆前对浆体进行试配，当试配浆体性能指标符合要求后，方可制备生产用浆体。灌浆用浆体的性能应符合下列规定：

1 水胶比不宜大于 0.45。

2 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。

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 每组应留取 6 个边长为 70.7mm 的立方体水泥浆试块，28d 标准养护的抗压强度值不应小于 30MPa。

6 灌浆材料和拌合用水中不应含有对预应力筋有害的化学成分，其中氯离子的含量不应大于胶凝材料总质量的 0.06%。

12.5.5 浆体自拌制完成至灌入孔道的延续时间不宜大于 30min，且在使用前和灌浆过程中应连续搅拌。对因延迟使用导致流动度降低的浆体，应采取二次搅拌措施，不应通过加水的方式增加浆体流动度。

12.5.6 灌浆顺序宜先灌下层孔道，后灌上层孔道。灌浆应连续进行，直至排气管排除的浆体稠度与注浆孔处相同且没有出现气泡后，再顺浆体流动方向将排气孔依次封闭；全部封闭后，宜继续加压 0.5MPa~0.7MPa，并稳压 1min~2min 后封闭灌浆口。

当发生孔道阻塞、串孔或中断灌浆时，应及时冲洗孔道或采取其他措施重新灌浆。

12.5.7 灌浆时，每一工作班应至少留取 6 个边长为 70.7mm 的立方体试块，标准养护 28d 后进行抗压强度试验，作为质量评定的依据。

12.5.8 采用连接器连接的多跨连续预应力筋的孔道灌浆，应在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。

12.5.9 对超长、超高的预应力筋孔道，宜采用多台灌浆泵接力灌浆的方法，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。

12.5.10 灌浆过程中及灌浆后 48h 内，预应力结构或构件的温度及环境温度不得小于 5℃。当环境温度小于 5℃时，应采取保温措施，并按冬期施工的要求处理，浆体中可适量掺入引气剂，但不得掺用防冻剂。当环境温度大于 35℃时，灌浆宜在夜间进行。

12.5.11 真空辅助压浆的孔道应具有良好的密封性。

12.5.12 真空辅助灌浆应符合下列规定：

1 灌浆前，应先关闭灌浆口的阀门及孔道全程的所有排气阀，然后在排浆端启动真空泵抽出孔道内的空气，使孔道真空负压达到 0.08MPa~0.10MPa，并保持稳定，再启动灌浆泵开始灌浆。

2 灌浆过程中，真空泵应保持连续工作，待浆体经过抽真空端时应关闭通向真空泵的阀门，同时打开位于排浆端上方的排浆阀门，在排出少许浆体后再关闭，然后灌浆工作继续按常规方法完成。

12.5.13 孔道灌浆应填写灌浆记录，记录包括：灌浆材料、配合比、灌浆日期、搅拌时间、出机初始流动度、环境温度、灌浆压力和灌浆情况等内容，采用真空辅助灌浆工艺时尚应包括真空度。有粘结预应力混凝土工程灌浆记录表格可参照附录 G 进行。

12.5.14 灌浆结束后，应及时清洗灌浆泵、拌浆机、管道及阀门等。

12.6 封 锚

12.6.1 后张法预应力筋锚固后的外露部分应采用机械切割工艺切除。

预应力筋的外露长度不宜小于其直径的 1.5 倍，且不应小于 30mm。

12.6.2 锚具封闭保护应符合设计要求。当设计无具体要求时，应符合下列规定：

1 凸出或内凹穴模内的锚具应采用与预应力结构构件相同强度等级的细石混凝土或无收缩防水砂浆封闭保护。

2 外露锚具和预应力筋的混凝土保护层厚度：处于一类环境时，不应小于 20mm；处于二 a、二 b 类环境时，不应小于 50mm；处于三 a、三 b 类环境时，不应小于 80mm。

3 锚具封闭前应将周围混凝土界面凿毛并冲洗干净，凸出式锚具封锚应配置钢筋网片。

4 后张无粘结预应力筋锚具封闭前，锚具和夹片应涂防腐蚀油脂，并设置封端塑料盖帽封闭。对处于二类、三类环境条件下的无粘结预应力筋及其锚固系统应达到全封闭保护状态。

12.6.3 锚具封闭后，封锚混凝土或砂浆应密实、无可视裂纹。

12.7 体外预应力束施工

12.7.1 体外束的锚固体系应与束体的形式和组成相匹配，可采用常规后张锚固体系或体外束专用锚固体系。对有整体调束要求的体外束锚固体系可采用锚具外螺母支撑承力方式。

12.7.2 体外束防腐材料的耐久性应与所属的环境和实际使用年限要求相一致，其制作、运输、安装和张拉过程中，应保证防腐材料具有稳定性、柔韧性、抗裂性并在所要求的温度范围内不流淌。

12.7.3 体外预应力转向块即为体外束的束形控制点，其安装时竖向位置偏差应符合表 12.7.3 的规定。

表 12.7.3 束形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

12.7.4 转向块与原结构的连接可采用结构加固用 A 级胶粘剂、化学锚栓、膨胀螺栓等，并应符合现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》GB 50367 的相关规定。

12.7.5 体外预应力束在穿索过程中注意排序，无法进行整束穿索的宜采用单根穿索的方法。并在张拉之前对所有预应力束均进行预紧。在穿索过程中需进行严格的防护措施，严禁拖曳体外束，以避免造成对表面防护层的损害，减弱体外束的防腐性能。

12.7.6 体外预应力束未张拉前，应由定位支架或其他措施控制位置。

12.7.7 预应力筋的张拉控制应力应符合设计要求。施工中如需超张拉，可比设计规定提高 5%，但需控制其最大张拉应力，对于预应力钢丝和钢绞线不宜大于 $0.6f_{ptk}$ ，且不应小于 $0.4f_{ptk}$ 。

12.7.8 体外束张拉宜先单根张拉至 $(0.1 \sim 0.15)\sigma_{con}$ ，再整束张拉至控制应力。张拉次序应能保证构件对称均匀受力，并采取避免张拉时梁出现侧向变形。

12.7.9 对同一束预应力筋，应采用相应吨位的千斤顶整束张拉。如整束张拉有困难，也可采用单根张拉工艺，但应考虑其相互影响。

12.7.10 体外束张拉锚固后，外露钢绞线长度应符合构造规定，当有换束需要时，应满足换束长度的要求，外露钢绞线长度一般为 250mm~600mm。

12.7.11 体外束外套管内采用水泥灌浆时，水泥浆强度应符合设计要求，灌浆应密实并连续包裹预应力筋全长，避免出现气泡。

12.7.12 体外束的锚具应设置全密封防护罩。对不可更换的体

外束，可在防护罩内灌注水泥浆或其他防腐蚀材料；对可更换的体外束应在防护罩内灌注油脂或其他可清洗的防腐材料。

12.7.13 当体外束有防火要求时，应涂刷防火涂料，或采取其他的防火措施。应按照安全可靠、经济实用的原则选用，并考虑下列条件：

1 在要求的耐火极限内，能有效地保护体外预应力筋、转向块、锚固块及锚具等。

2 防火材料应易与体外预应力体系结合，并对体外预应力体系不产生有害影响。

3 当钢构件受火产生允许变形时，防火保护材料不应发生结构性破坏，仍能保持原有的保护作用直至规定的耐火时间。

4 施工方便，易于保障施工质量。

5 防火保护材料不应对人体有毒害。

12.7.14 体外束张拉时，应做好记录，内容应包括：日期、张拉力、体外束伸长值和结构变形的测量值等。

12.7.15 体外预应力结构应在使用期限内进行检查和维护，检查的主要内容包括：预应力筋是否松弛、锚具及转向块是否有效、防腐防火涂层是否完好等；检查的时间间隔可由设计单位确定，但第一次检查应为竣工后一年，以后可每隔五年检查，遇到火灾、地震、台风等特殊情况应增加检查次数。

12.8 缓粘结预应力混凝土结构施工

12.8.1 缓粘结材料的固化时间和张拉适用期应根据施工进度和缓粘结预应力筋生产时间确定，对于过后浇带的缓粘结预应力筋，应考虑后浇带浇筑时间的影响。

12.8.2 施工过程中应做好缓粘结预应力钢绞线的留样。如果预应力专项验收时缓粘结材料还没达到固化时间，可根据环境温度和固化程度推断是否满足设计要求，缓粘结材料的固化时间不宜大于2年。

12.8.3 缓粘结预应力筋下料时，宜采用砂轮锯或切断机切断，

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缓粘结预应力筋。缓粘结预应力筋断料后，应采用专用封头帽进行封堵，以防止缓粘结剂外流。

12.8.4 缓粘结预应力筋按产品说明书要求进行运输和保存。露天堆放时，应确保将产品存放于阴凉干燥、通风良好的平整场地，远离热源、避免太阳暴晒，且应在堆放的缓粘结预应力筋上覆盖苫盖物或搭设遮阳棚。

12.8.5 检查外包护套外观，当外包护套轻微破损时，可采用外包防水聚乙烯胶带或热熔胶棒进行修补，外包防水聚乙烯胶带修复时每圈胶带搭接长度不应小于胶带宽度的 $1/2$ ，缠绕层数不应小于 2 层，缠绕长度应大于破损长度每边 50mm。1m 范围内出现 3 处大于 10mm 的破损的缓粘结钢绞线应予以报废。

12.8.6 缓粘结预应力筋进场时应有型式检验报告、出厂质量证明书或实验报告单。

12.8.7 缓粘结预应力筋进场检验，每种型号应以 60t 为一检验批，不足 60t 时，也应作为一个检验批进行检验。抽检应在监理工程师的见证下进行，抽检数量与检验方法应符合下列规定：

- 1 外观检查：缓粘结预应力钢绞线的外观检查应全数进行。
- 2 每批缓粘结预应力筋外观检查合格后，应随机抽取 3 盘进行现场抽样检查，在每盘端部截取 1 根试样，每根试件长 1m，进行缓粘结剂重量、护套厚度、肋高、肋宽和预应力钢绞线直径测量、力学性能检验。

- 3 缓粘结预应力筋缓粘结材料厚度、肋高、肋宽等应符合第 3.6.3 条规定。力学性能检验应符合国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224。

12.8.8 缓粘结预应力筋应铺设平顺，护套应密封良好且不得漏浆。端部锚垫板的承压面应与预应力筋或曲线末端的切线垂直，内埋式固定端锚垫板不应重叠，锚具与锚垫板应贴紧。

12.8.9 缓粘结预应力筋应按工程所需的长度和锚固形式进行下料和组装，并应采取措施防止缓粘结材料从端头流出。下料长度

应综合考虑其曲率、锚固端保护层厚度，并应根据不同的张拉方式和锚固形式预留张拉长度。

12.8.10 缓粘结预应力筋在张拉施工前应根据弹性模量和摩擦系数计算张拉伸长值。

12.8.11 缓粘结预应力混凝土工程在张拉前，宜先抽动缓粘结预应力钢绞线一次，确认缓粘结剂没有凝固后再张拉。

12.8.12 缓粘结预应力混凝土结构不宜在负温度下张拉施工，在小于 20°C 进行缓粘结预应力筋张拉时应采用持荷超张拉方式，预应力筋应力从零张拉至 $1.05\sigma_{\text{con}}$ ，并应在持荷一定时间后进行锚固，持荷时间可按本规程第 12.8.15 条规定确定。

12.8.13 施加预应力应以张拉伸长值为控制量，张拉力为校核量。实际伸长值与设计伸长值偏差不宜大于 $\pm 6\%$ 。当超出允许偏差时应停止张拉，经分析原因并采取措施后方可继续张拉。

12.8.14 初张拉力可为张拉控制力的 $10\%\sim 20\%$ 。张拉时可按张拉程序量测各级拉力对应的伸长值。其中 2 倍初张拉力和初张拉力对应的伸长值之差可作为 $0\rightarrow$ 初张拉力的伸长值，然后将各级的实际伸长值叠加应为实际的总伸长值。

12.8.15 当设计对预应力张拉程序无专门规定时，宜按下列程序张拉： $0\rightarrow$ 初张拉力 $\rightarrow$ 2 倍初张拉力 $\rightarrow$ 1.03 倍张拉控制力 $\rightarrow$ 持荷 $\rightarrow$ 锚固。缓粘结预应力张拉时应保证持荷时间，宜采用数控张拉。持荷时间应根据现场温度和固化程度确定，并应符合下列规定：

1 在气温小于 20°C 且大于 5°C 时，缓粘结材料未发生固化的情况下，持荷超张拉的持荷时间与温度之间的关系可按表 12.8.15 采用，必要时也可根据现场实测值确定。

表 12.8.15 持荷时间与构件温度之间的关系 (min)

温度	5°C	10°C	15°C	20°C
持荷时间	4	2	1	0.5

注：中间温度可按线性插值确定。

2 当气温大于 20℃，缓粘结材料未发生固化的情况下，可不持荷超张拉。

3 当气温大于 5℃，张拉时间接近缓粘结预应力筋张拉适用期，预应力筋摩擦系数偏大时，可采用预张拉或持荷超张拉的方法消除缓粘结材料初期固化对摩擦系数的影响。

4 当温度小于 5℃时不宜进行缓粘结预应力筋张拉。

5 当温度小于 5℃进行张拉时，应采用升温措施减小由粘滞力产生的预应力损失。

12.8.16 预张拉时先不装锚具夹片，将预应力筋张拉到控制应力的 30%左右放张，然后装锚具夹片正式张拉。

12.8.17 缓粘结预应力筋的张拉控制应力应符合设计要求。施工中如需超张拉，可比设计规定提高 5%，但其最大张拉控制应力不得大于 $0.8f_{ptk}$ 。

12.8.18 缓粘结预应力钢绞线张拉完毕，应及时检查张拉记录及锚固情况，经确认无误后，方可切断和封锚。缓粘结预应力钢绞线切断后露出锚具夹片外的长度不得小于 30mm。应在夹片及端头用防腐油脂或环氧类胶粘剂涂抹，再用微膨胀细石混凝土或无收缩砂浆进行封闭。

12.8.19 缓粘结预应力筋张拉过程及张拉完毕后的锚具，应按无粘结预应力混凝土结构的施工要求进行控制和防护。

12.9 施 工 管 理

12.9.1 预应力施工应建立项目管理机构、质量保证体系和安全保证体系。施工人员应具备相应的资格，接受总承包单位管理。

12.9.2 预应力专业施工单位应在建设单位或总承包单位主持下会同设计单位、监理单位对预应力工程图纸（含深化设计图纸）进行会审，熟悉设计意图，明确技术要点及难点，并形成会审纪要。

12.9.3 预应力混凝土结构施工前，预应力专业施工单位应根据设计图纸与现场施工条件，编制预应力专项施工方案。经单位技

术负责人审核，报总承包施工单位审定，监理单位批准后实施。

12.9.4 预应力筋和锚具、夹具、连接器和减震装置、传力节点等材料的品种、规格、强度等级应按设计要求选用，检验合格，方能使用。

12.9.5 预应力工程施工用的各种机具设备及仪表，应有专人操作使用，定期维护和校验。当施工过程发生下列情况之一时，应重新校验机具设备。

- 1 张拉时预应力筋连续断筋。
- 2 千斤顶严重漏油。
- 3 油压表指针不能回零点。
- 4 千斤顶调换油压表。
- 5 实测预应力伸长值与理论计算值相差过大。

12.9.6 施工总承包单位对现浇预应力结构的支架体系，应编制合适的支架搭设方案。

12.9.7 预应力筋或成孔管道铺设后，周边敷设的各种管线不应将预应力筋的竖向位置变动，在周围不得进行焊接作业，否则应采取防护措施。

12.9.8 张拉前预应力施工单位应对被张拉构件混凝土强度等级、端部预埋件、灌浆孔、外观等进行全面检查，在符合设计规定后，填写张拉通知单，经监理工程师签证后进行预应力筋张拉。

12.9.9 质量管理应符合下列要求：

1 材料采购必须严格按设计图纸规定的规格型号要求选择材料。

2 设备进场时，必须由质量负责人和监理工程师进行验收，验收合格后，方能投入使用。

3 预应力工程相关工序施工前，应由项目技术负责人向施工人员书面技术交底，并在施工过程中检查执行情况。

4 浇筑混凝土前，应由监理工程师组织隐蔽工程验收。

12.9.10 安全技术措施应符合下列要求：

1 预应力工程施工前应建立安全保证体系。操作现场应挂安全操作规程，并对全体人员做安全技术交底。

2 高空作业时，应编制安全专项方案。

3 现场拉束、放张及切割预应力筋时应采取防护措施，确保安全。

4 预应力张拉作业部位应设置安全护栏和安全警示标志，严禁其他工序人员同时作业，张拉构件两端正前方严禁站人，作业人员应位于千斤顶两侧。

5 孔道灌浆时，操作人员应戴防护眼镜，以防水泥浆喷出伤及眼睛。

13 检验与验收

13.1 一般规定

13.1.1 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、连接以及灌浆孔、排气兼泌水孔。
- 3 局部加强钢筋的牌号、规格、数量和位置。
- 4 预应力锚具和连接器及锚垫板的品种、规格、数量和位置。

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

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

13.1.3 预应力工程检验与监测的项目、内容以及要求应按工程类别不同分别进行。对一般预应力工程项目应进行原材料、制作与安装、张拉与放张、灌浆与封锚按照主控项目和一般项目进行现场检验；对重要及设计有要求的预应力工程除进行一般工程项目复验与检验外，还应进行现场张拉端锚固损失、有效预应力值和孔道摩擦损失值以及其他设计要求项目的监测。

13.2 原材料

主控项目

13.2.1 预应力筋进场时，应按国家现行相关标准的规定抽取试

件作力学性能检验，其检验结果应符合相应标准的规定。

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：检查产品合格证、出厂检验报告和进场复验报告。

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

检查数量：每 60t 为一批，每批抽取 3 根试样。

检验方法：观察，检查产品合格证、出厂检验报告和进场复验报告。

注：当有工程经验，并经观察认为质量有保证时，可不作油脂用量和护套厚度的进场复验。

13.2.3 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 的相关规定对其性能进行检验，检验结果应符合该标准的规定。

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：检查产品合格证、出厂检验报告、锚固区传力性能实验报告和进场复验报告。

注：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。

13.2.4 孔道灌浆用水泥应采用普通硅酸盐水泥，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：检查产品合格证、出厂检验报告和进场复验报告。

注：对孔道灌浆用水泥和外加剂用量较少的一般工程，当有可靠依据时，可不作材料性能的进场复验。