陕西省工程建设标准

缓粘结预应力混凝土结构技术规程

Technical Specification for Slow-Bonded

Prestressed Concrete Structures

（征求意见稿）

《缓粘结预应力混凝土结构技术规程》编制组

2024 年 10 月

前　言

根据陕西省住房和城乡建设厅、陕西省市场监督管理局《关于下达2022年度工程建设标准制定计划的通知》（陕建发〔2022〕1013 号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外标准，结合陕西省实际，在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分7章，主要技术内容包括：1、总则；2、术语和符号；3、基本规定；4、材料；5、设计；6、施工；7、质量控制与验收。

本规程由陕西省住房和城乡建设厅负责归口管理，陕西省建设标准设计站负责日常管理，陕西省建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请反馈给陕西省建筑科学研究院有限公司（地址：陕西省西安市莲湖区环城西路北段272号，邮编：710082，电话：029-88644344，邮箱：harvestzhou@163.com）。

本规程主编单位：　陕西省建筑科学研究院有限公司

中国建筑西北设计研究院有限公司

本规程参编单位：　陕西建工第九建设集团有限公司

中研兆科（北京）技术有限公司

陕西省建筑科学研究院设计院有限公司

中原工学院

西安工业大学

陕西省建筑设计研究院有限公司

中联西北工程设计研究院有限公司

陕西省建筑工程质量检测中心有限公司

长安大学

中国建筑第四工程局有限公司

陕西建科建设特种工程有限公司

中国建筑一局（集团）有限公司陕西分公司

陕西建工第六建设集团有限公司

西安建筑科大工程技术有限公司

陕西建工第八建设集团有限公司

宁夏千弓预应力技术工程有限公司

北京城建设计发展集团股份有限公司

本规程主要起草人员：贾俊明　高　慧　周春娟　柳明亮

车顺利　高　仓　梁　叶　惠　存

黄　华　李　锦　杨伏荣　邢国华

刘卫辉　刘　挺　李杨杨　常召群

董欢涛　张　云　杨　攀　刘顺锋

董振平　刘晓东　负作义　吴建辉

孙振岳　周　拓　孙胜兰　郭朋岗

黄思聪　王　庆　李　藤　王　寒

张凌菲　李瑾如

本规程主要审查人员：暂空

目　　次

1　总则 1

2　术语和符号 2

2.1　术　语 2

2.2　符号 3

3　基本规定 5

4　材　料 7

4.1　一般规定 7

4.2　混凝土和普通钢筋 7

4.3　缓粘结预应力筋 7

4.4　锚具系统 13

5　设　计 15

5.1　一般规定 15

5.2　预应力损失计算 21

5.3　结构计算 29

5.4　构造措施 38

5.5　抗震性能设计 41

6　施　工 45

6.1　一般规定 45

6.2　施工深化设计 45

6.3　施工准备 47

6.4　安装及混凝土浇筑 47

6.5　缓粘结预应力筋的张拉 50

6.6　防火与防腐 53

7　质量控制与验收 45

7.1　一般规定 57

7.2　原材料进场 57

7.3　下料与安装 59

7.4　张拉与封锚 60

7.5　验收 61
附录 A　缓粘结预应力类别的快速检验方法 64
附录 B　缓粘结预应力标准张拉适用期的检验方法 65
附录 C　缓凝粘合剂快速固化后力学性能的检验方法 66
附录 D　护套性能参数的检验方法 69
附录 E　摩擦系数测定方法 71
附录 F　附表 73
附表（一）缓粘结预应力筋进场检验记录表 73
附表（二）　缓粘结预应力筋下料及安装验收项目 74
附表（三）　缓粘结预应力筋张拉验收记录表 75
附表（四）　缓粘结预应力筋封锚验收记录表 76
附表（五）　缓粘结预应力工程张拉通知单 77
附表（六）　缓粘结钢绞线张拉验收记录表 79
本规程用词说明 80
引用标准名录 81

Contents

1 General provisions 1

2 Terminology and symbols 2

2.1 Terminology 2

2.2 Symbols 3

3 Basic provisions 5

4 Materials 7

4.1 General provisions 7

4.2 Concrete and ordinary reinforcement 7

4.3 Slow-bond prestressing tendons 7

4.4 Anchorage systems 13

5 Design 15

5.1 General provisions 15

5.2 Calculation of prestressing losses 21

5.3 Structural calculations 29

5.4 Structural measures 38

5.5 Seismic design 41

6 Construction 45

6.1 General provisions 45

6.2 Construction Intensification 45

6.3 Construction Preparation 47

6.4 Installation and Concreting 47

6.5 Tensioning of slow-bond prestressing tendons 50

6.6 Fire Protection and Corrosion Prevention 53

7 Quality Control and Acceptance 45

7.1 General Provisions 57

7.2 Raw Material Delivery 57

7.3 Unloading and Installation 59

7.4 Tensioning and Anchor Sealing 60

7.5 Acceptance 61

Appendix A Rapid Test Methods for Slow-Bonded Prestressing Categories 64
Appendix B Test Methods for Standardized Tensioning Periods for Slow-Bonded Prestressing ... 65
Appendix C Test Method for Mechanical Properties of Retarded Adhesives after Rapid Curing .. 66
Appendix D Methods of Test for Sheath Performance Parameters 69
Appendix E Method for determination of coefficient of friction 71
Appendix F Appendix 73
Schedule (I) Record Sheet of Field Inspection of Slow-bonded Prestressing Tendons 73
Schedule (II) Acceptance Items of Slow-Bonded Prestressing Tendon Underlayment and Installation 74
Schedule (III) Acceptance Record Sheet for Tensioning of Slow-bonded Prestressing Tendons 75
Schedule (IV) Acceptance record of slow-bonded prestressing tendon anchor sealing 76
Schedule (V) Notification Form for Tensioning of Slow Bonded Prestressing Works 77
Schedule (VI) Acceptance Record Sheet for Tensioning of Slowly Bonded Strand 79
Explanation of terms used in this specification 80
List of referenced standards 81

1 总则

1.0.1 为了更好的应用缓粘结预应力混凝土施工技术，做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量，制定本规程。

【条文说明】 缓粘结预应力技术是在有粘结和无粘结之后发展起来的一种新的预应力技术，是对有粘结和无粘结预应力技术的补充，缓粘结预应力具有无粘结预应力施工方便、构造简单的优点，也具有有粘结预应力混凝土结构延性好、抗震性能优等特点，同时，可避免有粘结预应力压力灌浆不密实引起的耐久性问题。日本和我国都在上世纪末开始进行缓粘结预应力技术研究和应用经过 10 多年的技术研究和最近 5 年~6 年的工程实践，我国缓粘结预应力技术已经在几十项工程中应用。编制本规程，一方面为了确保缓粘结预应力技术工程应用的工程质量，另一方面为了加快缓粘结预应力技术的推广应用。

1.0.2 本规程适用于建筑工程中采用缓粘结预应力混凝土结构的设计、施工及验收。

【条文说明】缓粘结预应力钢绞线由预应力钢绞线、外包护套和缓结剂组成，缓凝剂可分为两类，一类是环氧树脂类，另一类是缓凝砂浆类。环氧树脂类已经形成了缓粘结预应力钢绞线的生产线，缓凝砂浆类缓粘结钢绞线目前还没有实现产业化，因此，本规程没有涉及缓凝砂浆类的设计和施工。

缓粘结剂前期相当于无粘结的防腐油脂，具有一定流动性及对钢材良好的附着性，经挤压涂包工艺将预应力钢绞线及外包护套内的空隙填充并紧密封裹，随时间推移胶凝材料逐渐固化，与预应力钢绞线产生粘结力。缓粘结预应力筋与非预应力筋一起布置，然后浇筑混凝土，混凝土达到规定强度后进行预应力筋张拉，张拉后缓粘结剂在规定时间固化，当专用粘合剂完全固化后，通过凹凸不平的横肋与周围混凝土咬合，缓粘结预应力混凝土结构便具有有粘结预应力混凝土结构的力学效果，因此，缓结预应力技术主要应用在后张预应力混凝土结构中。本规程适合于工业与民用建筑和一般构筑物中采用的后张缓粘结预应力混凝土结构的设计、施工及验收。当在混凝土桥梁中应用时，可参考本规程。

1.0.3 缓粘结预应力混凝土结构工程施工及质量验收，除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和地方现行有关标准的规定。

【条文说明】缓粘结预应力混凝土结构是预应力混凝土结构中的预应力筋采用缓粘结预应力筋，因此，其设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的所有规定，只是缓结预应力筋的一些参数与有粘结预应力筋和无粘结预应力筋有所不同另外，缓粘结预应力混凝土结构的设计应符合国家现行标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB50068、《建筑抗震设计规范》GB50011 和《预应力混凝土结构抗震设计规程》JGJ140 等的相关规定，施工、验收应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204 的规定，本规程主要规定了缓粘结预应力混凝土结构特殊的要求。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 缓粘结预应力 retard-bonded prestress

通过缓粘结剂的固化实现预应力筋与混凝土之间从无粘结逐渐过渡到有粘结的一种预应力形式。

2.1.2 缓粘结预应力钢绞线 retard-bonded prestressing steel strand

用缓粘结剂涂敷和高密度聚乙烯护套包裹的预应力钢绞线。

2.1.3 护套 sheath

包裹在预应力钢绞线和缓粘结剂外的高密度聚乙烯套管。

2.1.4 横肋 transverse ril

缓粘结预应力钢绞线护套上与钢绞线轴线方向垂直的肋。

2.1.5 缓粘结预应力钢绞线专用粘合剂 retard-bonded adhesive

涂敷在预应力钢绞线外并包裹护套，按预期时间逐渐固化的胶凝材料，简称缓粘结剂。

2.1.6 张拉适用期 tensioning period limit

缓粘结剂从配制到仍适合于预应力钢绞线张拉的时间段。

2.1.7 标准张拉适用期 standard tensioning period limit

缓粘结剂在室温 25℃下的张拉适用期称为标准张拉适用期。

2.1.8 固化时间 curing time

缓粘结剂从配制经固化到规定强度的时间。

2.1.9 标准固化时间 standard curing time

缓粘结剂在室温 25℃下的固化时间称为标准固化时间。

2.1.10 粘滞力 viscous friction

缓粘结剂黏性引起的预应力筋与护套间的滑动阻力。

2.1.11 缓粘结预应力混凝土结构 retard-bonded prestressed concrete structure 配置缓粘结预应力钢绞线并经过张拉建立预加应力的混凝土结构。

2.2 符号

2.2.1 材料性能

E_c——混凝土弹性模量；

E_s——钢筋弹性模量；

E_p——预应力筋弹性模量；

f_c——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{tk}、f_t——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；

f_{ptk}——缓粘结预应力筋极限强度标准值；

f_{py}、f'_{py}——缓粘结预应力筋抗拉、抗压强度设计值；

f_y、f'_y——非预应力筋抗拉、抗压强度设计值；

f_{yv}——横向钢筋的抗拉强度设计值。

2.2.2 作用和作用效应

M——弯矩设计值；

M_{cr}——受弯构件正截面开裂弯矩值；

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——构件正截面受弯承载力设计值；

N_p——预应力混凝土构件的预加力；

N_{p0}——预应力构件混凝土法向预应力等于零时的预加力；

V——剪力设计值；

σ_{con}——缓粘结预应力筋的张拉控制应力；

σ_{pe}——缓粘结预应力筋的有效预应力；

σ_{pu}——在正截面承载力计算中缓粘结剂固化前缓粘结预应力筋的应力设计值；

σ_l、σ'_l——受拉区、受压区缓粘结预应力筋在相应阶段的预应力损失值；

W_{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——构件截面面积；

A_n——净截面面积；

A_p、A'_p——受拉区、受压区缓粘结预应力筋截面面积；

A_s、A'_s——受拉区、受压区非预应力钢筋截面面积；

B——受弯构件的截面刚度；

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_p——缓粘结预应力束等效孔道直径；

h——截面高度；

h_0——截面有效高度；

h_f、h'_f——T 形或 I 形截面受拉区、受压区的翼缘高度；

h_p——缓粘结预应力筋合力点至截面受压边缘的距离；

h_s——纵向受拉非预应力钢筋合力点至截面受压边缘的距离；

I_0——换算截面惯性矩；

W——截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

2.2.4 计算系数及其他

α_E——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量之比；

α_p——考虑缓粘结剂固化影响的预应力筋等效折减系数；

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；

γ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数；

η——预应力筋-锚具组装件静载试验测得的锚具效率系数；

κ——考虑缓粘结预应力筋每米长度局部偏差的摩擦系数；

μ—摩擦系数；

θ——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数，预应力筋从张拉端到计算截面曲线各部分切线的夹角之和；

ξ_p——综合配筋特征值。

3 基本规定

3.0.1 缓粘结预应力混凝土结构施工前，应由施工单位根据设计要求和施工现场实际情况，编制详细的预应力施工方案，施工方案应经设计单位确认后方可实施。

【条文说明】缓粘结预应力技术是在有粘结和无粘结基础上产生的，原来可以采用有粘结或无粘结预应力技术的混凝土结构，均可采用缓粘结预应力技术。缓粘结预应力施工的技术和工程质量要求高于传统无粘结和有粘结预应力工程，要求施工企业编制详细的预应力施工方案，并且须经由原设计单位认可才能实施。

3.0.2 混凝土梁、板、柱、墙等均可采用缓粘结预应力混凝土结构，当梁柱节点钢筋密集，采用预应力混凝土结构群锚布置困难时，宜优先采用缓粘结预应力混凝土结构。

【条文说明】梁柱节点钢筋密集时，采用有粘结预应力技术群锚布置会非常困难，由于缓粘结预应力钢绞线采用了单孔锚固，锚具尺寸大大缩小，采用缓粘结预应力技术可以有效解决这一问题。

3.0.3 缓粘结预应力混凝土结构设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定；结构上的直接作用应根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 及相关标准确定；地震作用应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB50011 的规定；间接作用或偶然作用应根据有关标准和具体情况确定。

【条文说明】缓粘结预应力混凝土结构内力计算、设计方法等都符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的相关规定，只是缓粘结预应力筋具有自身的力学参数，设计计算时需要注意参数即可。

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

【条文说明】缓粘结预应力混凝土结构极限状态的分类系根据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 确定，极限状态仍分为两类。预应力混凝土结构除进行使用阶段极限状态验算外还要进行施工阶段的验算，一方面防止预应力引起预拉区裂缝超过规定，另一方面应考虑施工阶段缓粘结剂尚未完全固化对预应力钢绞线的影响。

3.0.5 缓粘结预应力钢绞线必须在张拉适用期内进行张拉，其固化时间应符合本规程规定。

【条文说明】缓粘结预应力钢绞线张拉施工时若超出了张拉适用期范围，可能影响结构受力设计和结构安全，固化时间过短，不利于施工的进行，固化时间过长，对结构的安全性将产生不利影响。

3.0.6 施加预应力时，同条件养护的混凝土立方体抗压强度应符合设计要求，并应符合下列规定:

1 不应低于设计强度等级的 75%;

2 不应低于锚具供应商提供的产品技术手册要求的混凝土最低强度值要求;

3 对于现浇混凝土梁和板，混凝土龄期分别不宜低于 7d 和 5d。

当张拉预应力筋是为防止混凝土早期出现的收缩裂缝时:可不受上述 3 款的限制，但应符合局部受压承载力的规定。

3.0.7 缓粘结预应力混凝土结构施工使用的材料、产品和设备应符合相关标准、设计文件和施工方案的规定，并应综合考虑安全性能、使用功能、环境保护等要求。

3.0.8 缓粘结预应力混凝土结构施工应按照设计要求的施工顺序进行，保证各阶段不出现对结构不利的应力状态。

3.0.9 缓粘结预应力混凝土结构专业施工单位应严格执行质量检查与验收制度。缓粘结预应力混凝土分项工程施工质量验收除应符合本规程规定外，尚应符合现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300 和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

4 材 料

4.1 一般规定

4.1.1 预应力结构中宜使用高强混凝土和高强钢材。

4.1.2 选用不同强度等级的缓粘结预应力筋时应使用与其强度等级相匹配的锚具，同时锚固端需进行混凝土局部承压验算。

4.1.3 预应力钢绞线、缓凝粘合剂和护套用材料应在验收合格后方可使用。

【条文说明】缓粘结预应力混凝土技术兼顾无粘结预应力技术布筋灵活、施工简便和有粘结预应力技术安全性能高两者的优点，并弥补各自的不足，是一种新的预应力技术。为了在确保工程质量前提下，获得更好的综合经济效益与社会效益，对于材料以及锚具等要求较高。

4.2 混凝土和普通钢筋

4.2.1 缓粘结预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C30(来源于《缓粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ387-2017)，其中板的混凝土强度等级不应低于 C35，梁、柱混凝土强度等级不应低于 C40(来源于《天津市缓粘结预应力混凝土结构施工技术规程》DB/T 29-190-2019)，混凝土的力学性能指标应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

【条文说明】由于缓粘结预应力钢绞线采用了高强度低松弛预应力钢绞线，应采用较高强度等级的混凝土，才可充分发挥高强度预应力钢绞线的作用，达到更经济的目的。参考国内外的应用经验，规定混凝土强度等级不应低于 C35。对于预应力混凝土梁、柱，由于构件平均压应力和锚固区应力较高，为了减小截面尺寸，一般采用 C40 或以上强度等级的混凝土。结构中局部采用预应力混凝土构件时，结构混凝土强度等级要求可适当降低。

4.2.2 缓粘结预应力混凝土结构中纵向普通钢筋宜采用 HRB400 、HRB500 钢筋，其中梁、柱纵向受力钢筋应采用 HRB400 、HRB500 钢筋，箍筋宜采用 HRB400 、HRB500 钢筋(来源于《天津市缓粘结预应力混凝土结构施工技术规程》DB/T 29-190-2019)，普通钢筋的力学性能指标应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

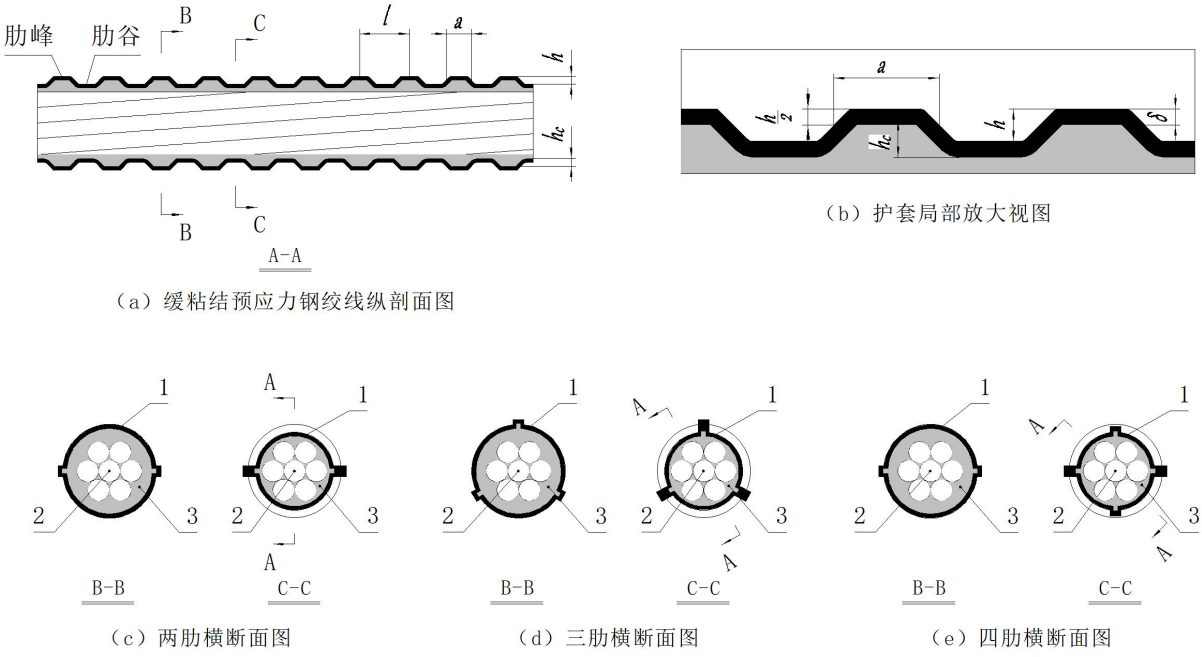
【条文说明】本条参考《混凝土结构设计规范》GB 50010 的相关规定。根据“四节一环保”的要求，提倡采用高强、高性能钢筋，这些钢筋已经广泛供应。在预应力混凝土构件中，受压区高度是按照预应力筋的条件屈服强度确定的，为了充分发挥钢筋强度并与预应力筋尽量协调，宜采用强度较高的普通钢筋，普通钢筋宜采用 HRB400、HRB500 钢筋。

4.3 缓粘结预应力筋

4.3.1 本规程所采用的缓粘结预应力筋均指缓粘结预应力钢绞线，其质量要求应符合现行行业标准《缓粘结

预应力钢绞线》JG/T369 的规定。缓粘结预应力钢绞线构造见图 4.3.1 所示，缓粘结预应力钢绞线由预应力钢绞线、缓凝粘合剂和护套组成；其中护套纵肋有两肋、三肋、四肋 3 种型式。两肋的两条纵肋沿预应力钢绞线通长连续贯穿横肋且呈对称分布；三肋的三条纵肋沿预应力钢绞线通长连续贯穿横肋且沿周长方向呈 120°等间距分布；四肋的四条纵肋是其中两条主纵肋通长贯穿横肋，两条副纵肋在横肋肋峰处被隔断、在横肋肋谷处延续。两肋、四肋、三肋对应的混凝土抗劈裂性能依次提高，宜优先选用三肋。

布设于混凝土结构面内的体内束应采用带横肋缓粘结预应力钢绞线；布设于混凝土结构面外的体外束可采用无肋光面缓粘结预应力钢绞线。



（a）缓粘结预应力钢绞线纵剖面图　（b）护套局部放大视图

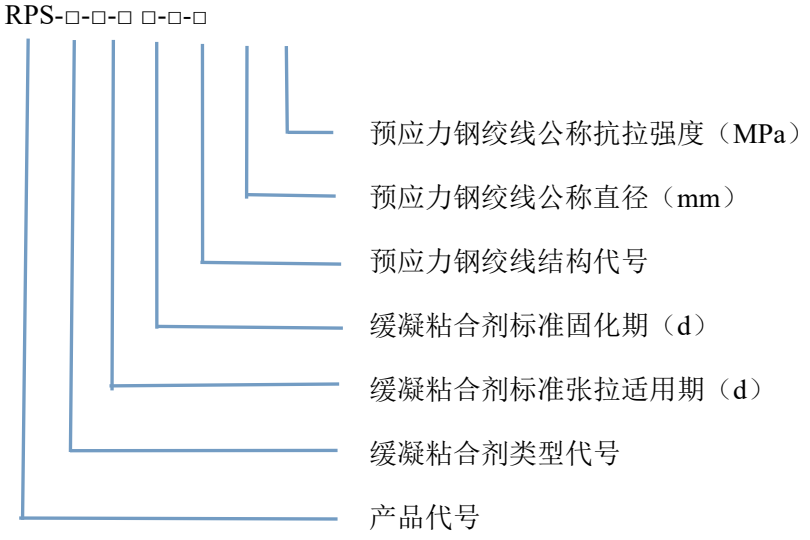
（c）两肋横断面图　（d）三肋横断面图　（e）四肋横断面图

图 4.3.1　缓粘结预应力钢绞线构造

1—护套；2—预应力钢绞线；3—缓凝粘合剂；h—肋高；h_c—内槽高；a—肋宽；l—肋间距；δ—护套厚度。

4.3.2 缓粘结预应力钢绞线的标记应符合下列要求：

缓粘结预应力钢绞线的标记由产品代号、粘合剂类型代号、结构代号和技术参数组成。



4.3.3 缓粘结预应力钢绞线应符合下列要求：

1 主要规格和性能应符合表 4.3.3 规定。

2 缓凝粘合剂的涂覆、护套的挤出成型及表面横纵肋的压制应一次连续完成。

3 缓凝粘合剂应沿预应力钢绞线全长填充且均匀饱满。

4 护套应厚度均匀、横纵肋规则一致，无气孔，无裂纹、损伤，无飞边、毛刺，轻微损伤处可采用外包聚乙烯胶带或热熔胶棒进行修补；护套颜色宜根据需要定制。

5 缓粘结预应力钢绞线端头处应包裹密实，防止缓凝粘合剂的渗漏。

表 4.3.3　缓粘结预应力钢绞线主要规格和性能

预应力钢绞线				缓凝粘合剂		护套							缓粘结预应力钢绞线		
结构代号	公称直径（Dn）mm	公称抗拉强度（Rm）MPa	公称横截面积（Sn）mm²	每延米理论质量 g/m	快速固化拉伸剪切强度 MPa	拉伸屈服应力 MPa	拉伸断裂标称应变 %	厚度（δ）mm	肋高（h）mm	内槽高（hc）mm	肋宽（a）mm	肋间距（l）mm	每延米理论质量 g/m	张拉适用期内摩擦系数	
														κ	μ
1×7	15.2	1860 1960 2160 2230	140	≥150	≥10	≥13	≥300	≥1.0	≥1.5	≥1.3	7～13	12～20	≥1390	≤0.004	≤0.09
	17.8		191	≥230					≥1.9	≥1.7			≥1870		
1×19S（1+9+9）	17.8		208	≥230									≥2000		
	21.8		313	≥300					≥2.1	≥1.9			≥2950		
1×19S（1+9+9）	28.6	1860	532	≥400									≥4800		
1×19W（1+6+6/6）	28.6	1860	532	≥400											
注：根据供需双方协商，可生产和供应其他类型、规格的缓粘结预应力钢绞线，其表中相关技术指标须由供应商提供相关试验及检测数据。															

4.3.4 制作缓粘结预应力钢绞线用的预应力钢绞线应符合下列要求：

1 规格尺寸和性能指标应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 的规定。

2 制作大直径缓粘结钢绞线用钢绞线规格及性能应符合国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T5224、《多丝大直径高强度低松驰预应力钢绞线》GB/T31314 的规定。

3 不应有死弯、表面不应生锈和沾染杂质，钢绞线中的每根钢丝应是通长的。

【条文说明】4.3.1~4.3.4 本规程所指的缓粘结预应力钢绞线，由钢绞线、缓粘结剂和外包高密度聚乙烯护套组成，缓粘结剂填充在外包套管和钢绞线之间，外包护套上有凸出的横肋。缓粘结预应力钢绞线在工程施工的前期像无粘结预应力筋一样布筋、张拉，缓粘结剂在预应力筋张拉后一段时间达到规定强度，预应力钢绞线可以和粘结剂紧密粘结，钢绞线与混凝土之间通过横肋的咬合作用产生粘结锚固，因此，在混凝土截面内采用缓粘结预应力筋时应采用带肋缓粘结预应力钢绞线，当用作体外预应力束时，表面可以无横肋，只是为了提高钢绞线耐久性。体外预应力混凝土结构设计和施工可参考《建筑结构体外预应力加固技术规程》JGJ/T 279 和《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92。

目前，后张预应力混凝土结构中使用最广泛的是 1×7 规格、公称直径 15.20mm 钢绞线，而且缓粘结预应力筋也都采用了这一规格的预应力钢绞线，《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 产品标准也只给出了这一规格的产品。

近年来，强度标准值达 1960MPa 的预应力钢绞线已经批量生产和供应，国家标准《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224 也给出了这一强度级别的力学性能，国外也有大直径缓粘结预应力钢绞线的应用。为了缓粘结技术进步和发展，在本规程中按 GB/T 5224 规定给出了目前国外有应用的大直径钢绞线数据。同时结合缓粘结预应力钢绞线的发展，将现在国外有应用的 1×19S，直径 21.8、28.6 的缓粘结钢绞线列入表中。另外，国内预应力钢绞线的品种发展很快，而标准存在一定的滞后性。故允许在供需双方同意的情况下，采用建筑行业标准虽尚未纳入但已被金属行业标准认可的新型钢绞线来制作缓粘结预应力钢绞线。

4.3.5 制作缓粘结预应力钢绞线用的缓凝粘合剂应符合下列要求：

1 主要性能指标应符合表 4.3.5-1 的规定。

表 4.3.5-1 缓凝粘合剂的主要性能指标

性能项目		指标
外观		质地均匀、无任何杂质
不挥发物含量/%		≥98
快速固化抗压强度/MPa		≥50
快速固化拉伸剪切强度/MPa		≥10
快速固化后耐久性能	耐湿热老化能力/50℃、95%RH 环境中老化 90 天后	拉伸剪切强度下降率≤15%
	耐冻融能力/-25℃⇆ 35℃环境下，每次循环 2-3h，经 50 次循环后	拉伸剪切强度下降率≤15%
	耐长期剪应力作用能力/60℃、5.0MPa 剪应力 210 天后	钢对钢拉伸剪切强度试件不破坏，且蠕变的变形值小于 0.4mm。

2 常用缓凝粘合剂的基本技术条件宜符合表 4.3.5-2 和 4.3.5-3 的规定。

表 4.3.5-2 常用缓凝粘合剂的类型

常用缓凝粘合剂类型	基本技术指标
热固型	适用于年平均温度 0℃～25℃的环境工况
湿气型	适用于年平均温度 0℃～35℃的环境工况
注：超过本表温度范围时缓凝粘合剂应进行特殊设计。	

表 4.3.5-3 常用缓凝粘合剂的基本技术指标表

常用缓凝粘合剂类型	适用环境条件	标准张拉适用期 d	标准有效强度期 d	标准固化期 d
热固型	适用于年平均环境温度≤25℃，混凝土水化热最高温度不超过 65℃	120±15	180±30	240±30
	适用于年平均环境温度≤25℃，混凝土水化热最高温度不超过 70℃	180±20	360±35	540±40
	适用于年平均环境温度≤25℃，混凝土水化热最高温度不超过 80℃	240±30	480±40	720±60
	适用于年平均环境温度≤25℃，混凝土水化热最高温度不超过 85℃	300±40	600±60	900±80
湿气型	适用于年平均环境温度≤35℃，混凝土水化热最高温度不超过 75℃	120±20	180±30	240±30
	适用于年平均环境温度≤35℃，混凝土水化热最高温度不超过 80℃	180±25	270±35	360±40
	适用于年平均环境温度≤35℃，混凝土水化热最高温度不超过 90℃	240±30	360±40	480±60
	适用于年平均环境温度≤35℃，混凝土水化热最高温度不超过 95℃	300±40	500±60	750±80
注：根据供需双方协商，可生产和供应其他类型缓凝粘合剂，相关技术指标需供应商提供有关试验及检测数据。				

3 缓粘结预应力钢绞线在运输贮存时环境日平均温度不应高于 40℃，应远离热源、避免太阳直接照射，保持通风阴凉。

4 缓凝粘合剂应对环境无污染、对人体无毒害。

5 有机类缓粘结剂初始黏度、固化后力学性能及耐久性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 的规定。

【条文说明】缓粘结剂本身不应对钢绞线和混凝土产生不利于安全的影响。缓粘结预应力筋中的有机类缓粘结剂初始粘度、固化后力学性能及耐久性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 的规定，是因为目前能够产业化的是符合该标准的专用粘合剂，缓凝砂浆也可以用于缓粘结预应力技术，但是暂时还没有产业化，没有相应的参数。

4.3.6 制作缓粘结预应力钢绞线用的护套原材应符合下列要求：

1 应采用挤塑型复合聚乙烯树脂，严禁使用聚氯乙烯。

2 性能指标应符合现行国家标准《聚乙烯(PE)树脂》GB/T 11115 的规定。

3 加色母粒的添加不应降低护套性能。

【条文说明】由于聚氯乙烯在长期使用过程中氯离子会析出，对周围的材料具有腐蚀作用，因此，严禁使用聚氯乙烯作为外包护套的材料。缓粘结预应力钢绞线采用高密度聚乙烯树脂做外包护套，在《缓粘结预应力钢绞线》JG/T 369 中规定应满足《高密度聚乙烯树脂》GB 11116 标准，现在，两项聚乙烯树脂标准合为《聚乙烯（PE）树脂》GB 11115 一项标准，因此，应符合该标准规定。

4.4 锚具系统

4.4.1 缓粘结预应力钢绞线锚具的选用应根据缓粘结预应力钢绞线的规格、强度及工程应用的环境类别选定。对常用的单根钢绞线，其张拉端宜采用单孔夹片锚具，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。当分段缓粘结预应力钢绞线需要连接时，可采用连接器连接。

4.4.2 缓粘结预应力钢绞线采用的锚具、夹具和连接器的性能应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 及现行行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85 的规定。

4.4.3 缓粘结预应力钢绞线-锚具组装件的静载锚固性能应符合下列公式规定：

$$\eta_{\mathrm{a}} \geq 0.95 \tag{4.4.3-1}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{apu}} \geq 2.0\% \tag{4.4.3-2}$$

式中：η_{a} --预应力钢绞线-锚具组装件静载试验测得的锚具效率系数，可按本规程第 3.3.4 条的公式计算;

$\varepsilon_{\mathrm{apu}}$ --预应力钢绞线-锚具组装件静载试验达到实测极限拉力时的总应变。

4.4.4 缓粘结预应力钢绞线-锚具组装件的锚具效率系数可按下式计算：

$$\eta_{\mathrm{a}} = \frac{F_{\mathrm{apu}}}{F_{\mathrm{pm}}} \tag{4.4.4}$$

式中: F_{apu} --单根预应力筋-锚具组装件的实测极限拉力(N);

F_{pm} --实测单根预应力筋破断荷载平均值(N)。

4.4.5 缓粘结预应力筋-锚具组装件的疲劳锚固性能，应满足试验应力上限取预应力筋极限强度标准值 f_{ptk} 的 65%、疲劳应力幅度不小于 80N/mm^2、循环次数为 200 万次要求的疲劳性能试验。当工程有特殊要求时，试验应力上限及疲劳应力幅值可根据工程需要确定。

4.4.6 承受低应力或动荷载的夹片式锚具应采取防松措施。

4.4.7 锚具应满足分级张拉、补张拉和放松拉力等张拉工艺的要求。锚固多根预应力钢绞线的锚具,应能满足整体张拉或单根张拉的工艺要求。

4.4.8 永久留在混凝土结构或构件中的预应力钢绞线连接器,应符合锚具的性能要求。在施工中临时使用并需要拆除的预应力钢绞线连接器,应符合夹具的性能要求。

4.4.9 预应力筋用夹具应具有良好的自锚性能、松锚性能和重复使用性能。

【条文说明】目前，缓粘结预应力筋大都采用直径 15.20mm 预应力钢绞线制造，单根张拉、单根锚固较为方便。张拉端采用夹片锚，埋入式固定端采用挤压锚，选用锚具或连接器时，可根据工程环境条件、结构的要求、预应力筋的品种、产品的技术性能、张拉施工方法和经济合理等因素进行综合分析比较后确定。当采用成束布置时，端部也应该分散开，采用单孔锚具锚固。由于群锚尺寸大，配套螺旋筋直径大，在梁柱节点不容易布置，因此，不建议采用群锚张拉锚固。

预应力筋—锚具组装件的静载和疲劳锚固性能，是根据现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 对锚具的锚固性能要求制定的。对于主要承受较大动荷载的预应力混凝土结构，要求所选锚具能承受的应力幅度可适当增加，具体数值可由工程设计单位根据需要确定。

缓粘结预应力钢绞线在凝固后，虽能获得有粘结预应力混凝土结构安全性能高的特点，但在张拉施工阶段直至固化时间达到之前张拉力依然依靠结构两端的锚具作用于混凝土体，故对 锚具系统的质量有很高要求。

5 设 计

5.1 一般规定

5.1.1 缓粘结预应力钢绞线专用粘合剂应在结构投入使用前固化，使用阶段承载力计算及正常使用极限状态验算均可按有粘结预应力考虑；施工阶段验算应按无粘结预应力考虑。

【条文说明】缓粘结预应力的特点是钢绞线与混凝土之间的粘结力要在缓粘结剂固化后建立。可以根据施工工期确定缓粘结预应力钢绞线的固化时间和相应的张拉适用期，并对张拉适用期留有一定的富余量，如工期稍有拖延，也能满足张拉的要求。一般情况下，固化时间为 2 年对应的张拉适用期约 8 个月，完全满足工程张拉要求和投入使用的时间要求。

5.1.2 缓粘结预应力混凝土构件的承载力极限状态应按下列公式验算：

持久设计状况、短暂设计状况：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d$$

地震设计状况：

$$S_d \leq R_d / \gamma_{RE}$$

式中：γ_0——结构重要性系数，应按现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153 执行；

S_d——承载力极限状态下荷载效应组合设计值，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定执行；

R_d——结构构件承载力设计值；

γ_{RE}——承载力抗震调整系数。

5.1.3 缓粘结预应力混凝土构件的正常使用极限状态验算，应根据荷载效应的标准组合并考虑长期作用的影响按下式验算：

$$S \leq C$$

式中：S——正常使用极限状态荷载效应组合设计值；

C——构件达到正常使用要求所规定的变形、裂缝宽度等的限值。

【条文说明】 5.1.2~5.1.3 给出了缓粘结预应力混凝土结构按承载力极限状态验算的统一公式和正常使用极限状态验算的统一公式，后面章节中极限状态验算只是结合缓粘结预应力技术特点给出了缓粘结预应力混凝土结构的验算，计算原理和计算公式都符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的规定。

5.1.4 缓粘结预应力混凝土受弯构件的正截面受弯承载力设计值与正截面开裂弯矩之间应符合下式规定:

$$M_u \geq M_{cr}$$

式中: M_u——构件正截面受弯承载力设计值（$N{\cdot}mm$）;

M_{cr}——受弯构件正截面开裂弯矩值（$N{\cdot}mm$）。

【条文说明】本条避免缓粘结预应力混凝土结构一旦开裂就破坏的脆性破坏。

5.1.5 由预加力产生的混凝土法向应力$\boldsymbol{\sigma_{pc}}$及相应阶段预应力筋的有效预应力$\boldsymbol{\sigma_{pe}}$，宜根据各阶段的预应力损失并考虑次内力影响，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。

【条文说明】 由预加力产生的混凝土法向应力和预应力筋应力计算时一定要注意计算阶段和相应的预应力损失值，预加力阶段采用扣除缓粘结预应力筋所占截面的净截面。

5.1.6 预加力$\boldsymbol{N_p}$及其作用点的偏心距$\boldsymbol{e_{pn}}$，宜根据各阶段有效预应力值及混凝土收缩、徐变对非预应力筋应力的影响，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。

【条文说明】预应力混凝土结构都采用了预应力筋和非预应力筋混合配筋的部分预应力混凝土结构，由于配有非预应力钢筋，预应力对混凝土产生的压应力会减小，普通钢筋的存在会影响混凝土收缩、徐变产生的预应力损失，现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 给出了计算方法。

5.1.7 缓粘结预应力混凝土结构施加预应力阶段，除应进行承载力极限状态验算外，还应按下列规定进行截面混凝土应力验算:

1 在施加预应力阶段，截面边缘的混凝土法向拉应力和法向压应力可按下列公式计算:

$$\sigma_{ct} = -\sigma_{pc} - \frac{N_k}{A_0} + \frac{M_k}{W_0}$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{pc} + \frac{N_k}{A_0} + \frac{M_k}{W_0}$$

2 施加预应力时截面拉应力区不允许出现裂缝的构件或全截面受压的构件，截面边缘的混凝土法向拉应力和法向压应力宜符合下列公式规定:

$$\boldsymbol{\sigma_{ct}} \leq f'_{tk}$$

$$\boldsymbol{\sigma_{cc}} \leq 0.8f'_{ck}$$

式中: $\boldsymbol{\sigma_{ct}}$——相应施工阶段计算截面预拉区边缘纤维的混凝土拉应力（$N{\cdot}mm^2$），拉应力为正;

$\boldsymbol{\sigma_{cc}}$——相应施工阶段计算截面预压区边缘纤维的混凝土压应力（$N{\cdot}mm^2$），压应力为正;

f'_{tk}、f'_{ck}——与各施工阶段混凝土立方体强度 f'_{cu}相应的抗拉强度标准值、抗压强度标准值（$N{\cdot}mm^2$）;

N_k、M_k——按构件自重及施工荷载效应的标准组合计算的轴向力值（N，压力时取正值）、弯矩值（$N{\cdot}mm$，取正值）;

A_0、W_0——构件验算截面的换算截面面积（mm^2）、验算边缘的换算截面弹性抵抗矩（mm^3）。

3 简支构件的端部区段，截面拉应力区边缘纤维的混凝土拉应力可大于$f_{tk}^{'}$，但不应大于 1.2$f_{tk}^{'}$。

4 叠合式受弯构件，当有可靠的工程经验时，混凝土法向拉应力可按$\boldsymbol{\sigma_{ct}}$不大于 2$f_{tk}^{'}$控制。

【条文说明】本条规定了张拉阶段截面混凝土应力控制值，一方面为了防止张拉时混凝土强度还没有达到设计强度而产生开裂;另一方面，张拉时使用荷载还没加上，防止使用荷载下混凝土受压区可能由于预应力张拉产生的拉应力而导致混凝土开裂。另外，对于预制的缓粘结预应力混凝土构件，吊装时应考虑动力冲击荷载的影响。

5.1.8 预拉区非预应力钢筋应符合下列规定:

1 施工阶段预拉区允许出现拉应力的构件，预拉区纵向钢筋的配筋率$\frac{A_s^{'}}{A_0}$不宜小于 0.15%，其中A为构件截面面积;

2 预拉区纵向普通钢筋的直径不宜大于 14mm，并应沿构件预拉区外边缘均匀配置;

3 施工阶段预拉区不允许出现裂缝的板类构件，预拉区纵向钢筋的配筋可根据具体情况按实践经验确定。

【条文说明】本条参考了现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010，主要是控制预拉区混凝土可能开裂的裂缝宽度，提高结构耐久性。预拉区纵向普通钢筋的直径不宜大于 14mm 是指构造用钢筋，当承载力需要时，直径可不受此限制。

5.1.9 混凝土结构的耐久性应根据结构的设计使用年限、结构所处的环境类别和环境作用等级进行设计。

当具有定量的劣化模型时，可按本标准附录 A 的规定针对耐久性参数和指标进行定量设计；暴露于氯化物环境下的重要混凝土结构，应按附录 A 规定针对耐久性参数和指标进行定量设计与校核。

5.1.10 混凝土结构的耐久性设计应包括下列内容:

1 确定结构的设计使用年限、环境类别及其作用等级;

2 采用有利于减轻环境作用的结构形式和布置;

3 规定结构材料的性能与指标;

4 确定钢筋的混凝土保护层厚度;

5 提出混凝土构件裂缝控制与防排水等构造要求;

6 针对严重环境作用采取合理的防腐蚀附加措施或多重防护措施;

7 采用保证耐久性的混凝土成型工艺、提出保护层厚度的施工质量验收要求;

8 提出结构使用阶段的检测、维护与修复要求，包括检测与维护必需的构造与设施;

9 根据使用阶段的检测必要时对结构或构件进行耐久性再设计。

5.1.11 混凝土结构的耐久性设计应建立结构在使用阶段的维护制度。维护制度应以施工结束或竣工验收状态为起点，根据使用周期中结构与构件的劣化规律与使用要求，综合考虑结构全寿命周期的性能与成本，确定合理的维护技术和维护频次。

5.1.12 无粘结预应力混凝土结构构件，除应根据设计状况进行承载力计算及正常使用极限状态验算外，尚应在施工阶段对实际受力状态进行验算。

5.1.13 无粘结预应力混凝土结构应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定进行结构计算，并应符合下列规定：

1 无粘结预应力混凝土结构的计算模型应能反映结构的实际受力状况，宜建立整体模型进行分析；

2 当结构在施工阶段和使用阶段有多种受力状况时，预应力作用效应宜分别建立模型进行结构分析；

3 预应力构件及与预应力构件相关的非预应力构件均应计入预应力作用效应的影响；

4 由预应力作用引起的内力和变形可采用弹性理论分析，构件截面的几何特征可按毛截面计算。

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

1 对承载能力极限状态，当预应力作用效应对结构有利时， 预应力分项系数γ_P应取 1.0；不利时γ_P应取 1.2。

2 对正常使用极限状态，预应力分项系数γ_P应取 1.0。

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

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

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

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

5.1.18 在无粘结预应力混凝土结构设计中，宜采取下列措施减少柱和墙等约束构件对梁、板预加应力效果的不利影响：

1 宜将抗侧刚度较大的构件布置在结构平面的中心附近，也可通过设置后浇带将抗侧刚度较大的构件分散于每个结构区段的中心附近；

2 结构长度超过 60m 时，可采用后浇带或施工缝对结构分段施加预应力；

3 梁和支承柱之间的节点可设计为在张拉过程中能滑动的支座。

5.1.19 无粘结预应力混凝土结构应具有整体稳固性，结构的局部破坏不应导致大范围坍塌。对无粘结预应力混凝土单向多跨连续梁、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。

5.1.20 无粘结预应力混凝土结构构件正截面裂缝控制验算时，裂缝控制等级、荷载引起的混凝土拉应力限值和最大裂缝宽度限值应符合表 5.1.20 的规定；斜截面裂缝控制验算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。正截面的受力裂缝控制等级可分为三级，等级划分及要求应符合下列规定:

1 一级 —— 严格要求不出现裂缝的无粘结预应力混凝土构件，在荷载标准组合下，构件截面边缘混凝土不应产生拉应力。

2 二级 —— 一般要求不出现裂缝的构件，根据结构类型和环境类别，在荷载标准组合下，构件截面边缘混凝土拉应力应符合表 5.1.20 的规定。

3 三级 -- 允许出现裂缝的构件，按荷载标准组合并考虑长期作用的影响计算时，构件的最大裂缝宽度应符合表 5.1.20 规定的最大裂缝宽度限值的规定 对处于二 a 类环境的构件，按荷载准永久组合计算的构件受拉边缘混凝土拉应力，应符合表 5.1.20 的规定。

4 当施加预应力仅为了减小钢筋混凝土构件的裂缝宽度或满足构件的允许挠度限值，以及改善环境温度和混凝土收缩作用影响时，构件的裂缝控制等级、荷载引起的混凝土拉应力限值和最大裂缝宽度限值可不受表 5.1.20 的限制。

表 5.1.20 无粘结预应力混凝土构件的裂缝控制等级、混凝土拉应力限值及最大裂缝宽度限值

环境类别	构件类别	裂缝控制等级	
		标准组合下混凝土拉应力限值$\sigma_{ctk,\ lim}$（N/mm²）或最大裂缝宽度限值w_{lim}（mm）	准永久组合下混凝土拉应力限值$\sigma_{ctk,\ lim}$（N/mm²）
一	周边支承楼（屋）面板的支座、连续梁、框架梁、偏心受压构件及一般构件	三级	
		0.2	—
	周边支承楼（屋）面板的跨中及柱支承双向板、预制屋面梁	二级	
		$1.0f_{tk}$	—
	轴心受拉构件	二级	
		$0.5f_{tk}$	—
二 a	轴心受拉构件	二级	
		$0.5f_{tk}$	—
	基础板及其他构件	三级	
		0.1	$1.0f_{tk}$
二 b	轴心受拉构件	二级	
		$0.3f_{tk}$	0
	基础板及其他构件	$1.0f_{tk}$	$0.2f_{tk}$
三 a 三 b	结构构件	一级	
		0	

5.1.21 对振动舒适度有要求的楼盖结构，在正常使用极限状态下，楼盖结构竖向振动频率宜满足表 5.1.21 的要求，不满足表 3.1.21 的要求时可根据功能要求对相应的振动指标进行分析。工业建筑及有特殊要求的建筑应根据使用功能提出要求。

表 5.1.11 楼盖结构竖向振动频率

建筑功能	楼盖结构竖向振动频率
住宅和公寓	≥5Hz
办公楼和旅馆	≥4Hz
大跨公共建筑	≥3Hz

5.1.22 无粘结预应力混凝土等截面梁、板的竖向振动频率可按下式计算：

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{\delta}}$$

式中： f_1----等截面梁或板的竖向振动频率（Hz）；

δ----等截面梁或板在有效荷载作用下的挠度（mm）。有效荷载取楼盖自重与有效分布活荷载之和，有效分布活荷载对住宅和公寓可取 0.25kN/m^2，其他结构可取 0.50kN/m^2。

5.1.23 板内双向布置预应力筋时，宜避免或减少双向预应力筋的交叉编网。

5.1.24 当无粘结预应力筋长度超过 60m 时，宜采取分段张拉和锚固。当无粘结预应力筋长度超过 40m 时，宜采取两端张拉；

5.2 预应力损失计算

5.2.1 缓粘结预应力筋的预应力损失值可按表 5.2.1 的规定计算。当计算求得的预应力总损失值小于 80N/mm^2 时，应取 80N/mm^2。

表 5.2.1 预应力损失值（N/mm^2）

引起损失的因素		符号	取值
张拉端锚具变形和预应力筋内缩		σ_{l1}	按本规程第 4.2.2 条和第 4.2.3 条的规定计算
预应力筋的摩擦	与护套壁之间的摩擦	σ_{l2}	按本规程第 4.2.4 条的规定计算
	张拉端锚口损失		按实测值或厂家提供的数据计算
预度力筋的应力松弛		σ_{l4}	按本规程第 4.2.5 条的规定计算
混凝土的收缩和徐变		σ_{l5}	按本规程第 4.2.6 条的规定计算
混凝土弹性压缩		σ_{l7}	按本规程第 4.2.7 条的规定计算

5.2.2 缓粘结预应力直线筋由于锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失 σ_{l1}（N/mm^2）可近似按下式计算：

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_p \qquad (5.2.2)$$

式中：a——锚具变形及预应力筋内缩值（mm），可按表 5.2.2 式中采用；

l——张拉端至锚固端之间的距离（mm）；

E_p——预应力筋弹性模量（N/mm'）。

表 5.2.2 锚具变形和预应力筋内缩值a

锚具类别		a（mm）
夹片式锚具	有顶压时	5
	无顶压时	6~8

注：1 表中的锚具变形和预应力筋内缩值也可根据实测数据确定；

2 其他类型的锚具变形和预应力筋内缩值应根据实测数据确定

5.2.3 缓粘结预应力曲线筋或折线筋由于锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值σ_{l1}，应根据缓粘结曲线筋或折线筋与护套之间反向摩擦长度l_f范围内的缓粘结预应力筋变形值等于锚具变形和预应力筋内缩值的条件确定。常用束形预应力筋在反向摩擦影响长度l_f范围内的预应力损失值σ_{l1}的计算，可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定执行。

5.2.4 当采用持荷超张拉方式消除缓粘结预应力筋与护套之间的粘滞力时，缓粘结预应力筋与护套壁之间的摩擦引起的预应力损失值 σ_{l2}（N/mm^2）（图 5.2.4）可按下列公式计算：

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\mathrm{con}}\left(1 - e^{-\kappa x - \mu\theta}\right) \qquad (5.2.4\text{-}1)$$

当$\kappa x + \mu\theta \leqslant 0.3$ 时，σ_{l2}可按下列近似公式计算：

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con}\ (\kappa x + \mu\theta) \qquad (5.2.4\text{-}2)$$

式中：κ——考虑缓粘结预应力筋护套壁每米长度局部偏差的摩擦系数（/m），按表 5.2.4 采用；

μ——缓粘结预应力筋与护套壁之间的摩擦系数，按表 5.2.4 采用

x——从张拉端到计算截面的曲线长度（m），可近似取该曲线在纵轴上的投影长度；

θ——从张拉端到计算截面曲线各部分切线的夹角之和对应的弧度值。

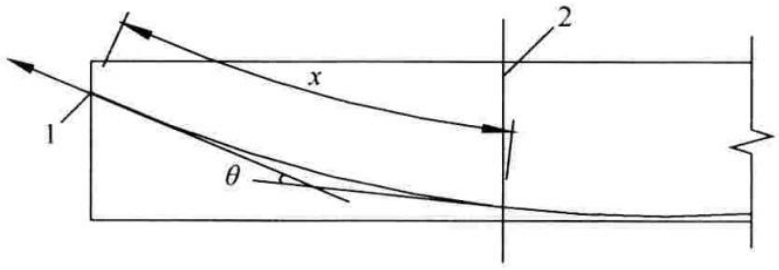


图 5.2.4 预应力摩擦损失计算

1— 张拉端；2—计算截面

表 5.2.4 缓粘结预应力筋的摩擦系数

钢绞线公称直径（mm）	κ（/m）	μ
15.20	0.006	0.12

注：表中系数也可根据实测数据确定或由厂家提供。

5.2.5 混凝土收缩、徐变引起受拉区和受压区纵向缓粘结预应力筋的预应力损失值$\sigma_{l5}(\mathrm{N/mm^2})$、$\sigma'_{l5}(\mathrm{N/mm^2})$可按下列规定确定：

1 一般情况构件，可不考虑混凝土收缩、徐变及预应力筋应力松弛引起的预应力损失值随时间的变化，$\sigma_{l5}(\mathrm{N/mm^2})$、$\sigma'_{l5}(\mathrm{N/mm^2})$按下列公式计算：

$$\sigma_{l5}=\frac{55+300\frac{\sigma_{\mathrm{pc}}}{f_{\mathrm{cu}}}}{1+15\rho} \tag{5.2.6-1}$$

$$\sigma'_{15}=\frac{55+300\frac{\sigma'_{\mathrm{pc}}}{f_{\mathrm{cu}}}}{1+15\rho'} \tag{5.2.6-2}$$

式中：f'_{cu}——施加预应力时混凝土立方体抗压强度（$\mathrm{N/mm^2}$）；

ρ、ρ'——受拉区、受压区缓粘结预应力筋和非预应力筋的配筋率：$\rho=(A_p+A_s)/A_n$，$\rho'=(A'_p+A'_s)/A_n$；对于对称配置预应力筋和非预应力筋的构件，配筋率ρ、ρ'应按钢筋总截面面积的一半计算；

σ_{pc}、σ'_{pc}——受拉区、受压区预应力筋合力点处混凝土法向压应力（$\mathrm{N/mm^2}$）；计算σ_{pc}、σ'_{pc}时，预应力损失值仅考虑混凝土预压时（第一批）的损失σ_{l1}与σ_{l2}；σ_{pc}、σ'_{pc}值不得大于$0.5f'_{cu}$.；当σ'_{pc}为拉应力时，公式（5.2.6-2）中的σ'_{pc}应取零；计算σ_{pc}、σ'_{pc}时，可根据构件制作情况考虑自重的影响；对处于年平均湿度低于 40%干燥环境的结构，σ_{l5}、σ'_{l5}应增加 30%。

2 重要的结构构件，当需要考虑与时间相关的混凝土收缩、徐变及预应力筋应力松弛引起的预应力损失值时，宜按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定执行。

5.2.6 缓粘结预应力筋采用分批张拉时，应考虑后批张拉预应力筋所产生的混凝土弹性变形对先批张拉预应力筋的影响，可将先批张拉预应力筋的张拉控制应力值σ_{con}增加$\alpha_{\mathrm{E}}\sigma_{\mathrm{pci}}$。此处，$\alpha_{\mathrm{E}}$为预应力筋弹性模量与混凝土弹性模量比，$\sigma_{\mathrm{pci}}$为后批张拉预应力筋在先批张拉预应力筋重心处产生的混凝土法向压应力。

5.2.7 缓粘结预应力混凝土构件在各阶段的预应力损失值宜按表 5.2.7 的规定进行组合。

表 5.2.7 各阶段预应力损失值的组合

预应力损失值的组合	预应力损失值
混凝土预压时（第一批）的损失	$\sigma_{l1}+\sigma_{l2}$
混凝土预压时（第二批）的损失	$\sigma_{l4}+\sigma_{l5}$

【条文说明】5.2.1~5.2.7 缓粘结预应力筋预应力损失值的计算原则和计算公式都按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 的有关规定执行。缓粘结预应力筋摩擦产生的预应力损失与有粘结预应力筋和无粘结预应力筋有很大的不同，缓粘结预应力钢绞线和外包护套之间有一层缓粘结剂，预应力钢绞线张拉过程中除了摩擦损失外，还存在粘滞力的影响，见第 2.1.10 条条文说明。缓粘结剂在冬季低温下黏度变大，张拉时粘滞力变大;缓粘结剂在开始固化后，粘滞力也会变大。缓粘结预应力筋在张拉适用期张拉时，粘滞力较小，因此，必须在张拉适用期内进行张拉

表 5.2.4 中的摩擦系数是指张拉适用期内、常温下张拉时的摩擦系数参考值。当因工程原因，必须在超过张拉适用期进行张拉时，摩擦系数会有所增大，施工中应该注意。

粘滞力是缓粘结预应力钢绞线的主要特点，根据试验研究，当钢绞线在护套内滑动速度为 v=1.0mm/s 时，缓粘结剂初始黏度为 100Pa·s 时，粘滞力与温度的关系见图 1。由于粘滞力与滑动速度成正比，因此，可以通过控制张拉速度减小粘滞力影响。从图 1 中可以看出，当温度为 20℃以上时，粘滞力只有 0.14kN/m，影响较小，5℃以下影响较大。根据试验研究，确定采用持荷超张拉方式减小粘滞力的影响，通过控制张拉速度减小缓粘结钢绞线粘滞力的影响，张拉到 1.05σ_{con}，持荷一定时间，然后锚固。

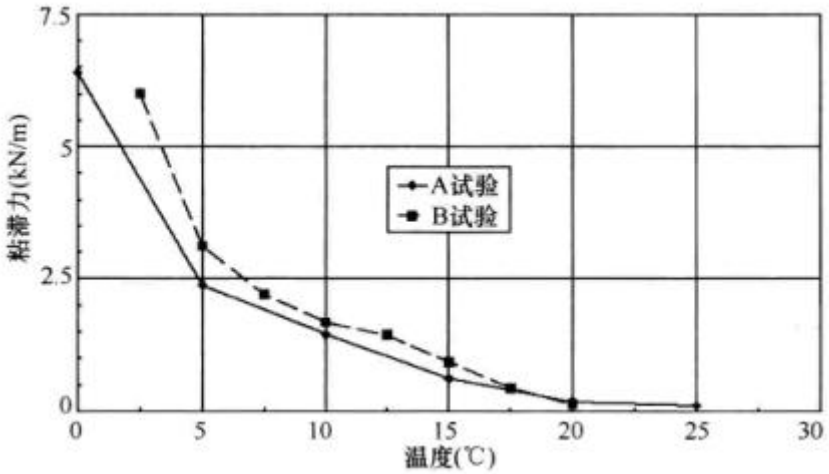


图 1 不同温度下缓粘结预应力钢绞线张拉的粘滞力

5.2.8 预应力筋中的预应力损失值可按表 5.2.8 的规定计算。

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:

先张法构件 100N/mm^2;

后张法构件 80N/mm^2。

表 5.2.8 预应力损失值（N/mm^2）

引起损失的因素		符号	先张法构件	后张法构件
张拉端锚具变形和预应力筋内缩		σ_{l1}	按本规范第 5.2.9 条的规定计算	按本规范第 5.2.9 条和第 5.2.10 条的规定计算
预应力筋的摩擦	与孔道壁之间的摩擦	σ_{l2}	—	按本规范第 5.2.11 条的规定计算
	张拉端锚口摩擦		按实测值或厂家提供的数据确定	
	在转向装置处的摩擦		按实际情况确定	
混凝土加热养护时，预应力筋与承受拉力的设备之间的温差		σ_{l3}	$2\Delta t$	—
预应力筋的应力松弛		σ_{l4}	消除应力钢丝、钢绞线 普通松弛： $0.4\ (\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}}-0.5)$ 低松弛： 当$\sigma_{con}\leq 0.7f_{ptk}$时 $0.125\ (\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}}-0.5)\ \sigma_{con}$ 当 $0.7f_{ptk}\leq\sigma_{con}\leq 0.8f_{ptk}$时 $0.2\ (\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}}-0.575)\ \sigma_{con}$ 中强度预应力钢丝：$0.08\sigma_{con}$ 预应力螺纹钢筋：$0.03\sigma_{con}$	
混凝土的收缩和徐变		σ_{l5}	按本规范第 10.2.5 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不大于 3m 时，由于混凝土的局部挤压		σ_{l6}	—	30

注：1 表中Δt为混凝土加热养护时，预应力筋与承受拉力的设备之间的温差（°C）

2 当$\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}}\leq 0.5$ 时，预应力筋的应力松弛损失值可取为零。

【条文说明】预应力混凝土用钢丝、钢绞线的应力松弛试验表明，应力松弛损失值与钢丝的初始应力值和极限强度有关。表中给出的普通松弛和低松弛预应力钢丝、钢绞线的松弛损失值计算公式，是按国家标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223-2002 及《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224-2003 中规定的

数值综合成统一的公式，以便于应用。当σ_{con}/f_{ptk}≤0.5 时实际的松弛损失值已很小，为简化计算取松弛损失值为要，预应力纹钢筋、中强度预应力钢丝的应力松弛损失值是分别根据国家标准《预应力混凝土用螺纹钢筋》GB/T 20065-2006、行业标准《中强度预应力混凝土用钢丝》YB/T 156-1999 的相关规定提出的，

5.2.9 直线预应力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}应按下列公式计算：

$$\sigma_{l1}=\frac{a}{l}E_s \tag{5.2.9}$$

式中：a——张拉端锚具变形和预应力筋内缩值（mm），可按表 5.2.9 采用；

l——张拉端至锚固端之间的距离（mm）

表 5.2.9 锚具变形和预应力筋内缩值a（mm）

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

注：1 表中的锚具变形和预应力筋内缩值也可根据实测数据确定；

2 其他类型的锚具变形和预应力筋内缩值应根据实测数据确定。

块体拼成的结构，其预应力损失尚应计及块体问填缝的预压变形。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。

【条文说明】根据锚固原理的不同，将锚具分为支承式和夹片式两类，对每类作出规定。对夹片式锚具的锚具变形和预应力筋内缩值按有顶压或无顶压分别作了规定。

5.2.10 后张法构件曲线预应力筋或折线预应力筋由于锚具变形和预应力筋内缩引起的预应力损失值σ_{l1}，应根据曲线预应力筋或折线预应力筋与孔道壁之间反向摩擦影响长度l_f范围内的预应力筋变形值等于锚具变形和预应力筋内缩值的条件确定，反向摩擦系数可按表 5.2.11 中的数值采用。

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

$$\sigma_{l2}=\sigma_{\text{con}}\left(1-\frac{1}{e^{\kappa x+\mu\theta}}\right) \tag{5.2.11-1}$$

当（$\kappa x+\mu\theta$）不大于 0.3 时，σ_{l2}可按下列近似公式计算：

$$\sigma_{l2}=\ (\kappa x+\mu\theta)\ \sigma_{\text{con}} \tag{5.2.11-2}$$

注：当采用夹片式群锚体系时，在σ_{con}中宜扣除锚口摩擦损失。

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

θ——从张拉端至计算截面曲线孔道各部分切线的夹角之和（rad）；

κ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数，按表 5.2.11 采用；

μ——预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数，按表 5.2.11 采用。

表 5.2.11 摩擦系数

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

注：摩擦系数也可根据实测数据确定。

在公式（5.2.11-1）中，对按抛物线、圆弧曲线变化的空间曲线及可分段后叠加的广义空间曲线，夹角之和θ可按下列近似公式计算：

抛物线、圆弧曲线：

$$\theta = \sqrt{a_{\mathrm{v}}^2 + a_{\mathrm{h}}^2} \qquad (5.2.11\text{-}3)$$

广义空间曲线：

$$\theta = \sum\sqrt{a_{\mathrm{v}}^2 + a_{\mathrm{h}}^2} \qquad (5.2.11\text{-}4)$$

式中：a_{v}、a_{h}——按抛物线、圆弧曲线变化的空间曲线预应力筋在竖直向、水平向投影所形成抛物线、圆弧曲线的弯转角；

Δa_{v}、Δa_{h}——广义空间曲线预应力筋在竖直向、水平向投影所形成分段曲线的弯转角增量。

【条文说明】预应力筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失，包括沿孔道长度上局部位置偏移和曲线弯道摩擦影响两部分。在计算公式中，x 值为从张拉端至计算截面的孔道长度;但在实际工程中，构件的高度和长度相比常很小，为简化计算，可近似取该段孔道在纵轴上的投影长度代替孔道长度;θ值应取从张拉端至计算截面的长度上预应力孔道各部分切线的夹角（以弧度计）之和。本次修订根据国内工程经验，增加了按抛物线、圆弧曲线变化的空间曲线及可分段善加的广义空间曲线θ弯转角的近似计算公式。

研究表明，孔道局部偏差的摩擦系数 k 值与下列因素有关：预应力筋的表面形状：孔道成型的质量;预应力筋接头的外形;预应力筋与孔壁的接触程度（孔道的尺寸，预应力筋与孔壁之间的间隙大小以及

预应力筋在孔道中的偏心距大小）等，在曲线预应力筋摩擦损失中预应力筋与曲线弯道之间摩擦引起的损失是控制因素。

根据国内的试验研究资料及多项工程的实测数据，并参考国外规范的规定，补充了预埋塑料波纹管、无粘结预应力筋的摩擦影响系数。当有可靠的试验数据时，本规范表 5.2.11 所列系数值可根据实测数据确定。

5.2.12 混凝土收缩、徐变引起受拉区和受压区纵向预应力筋的预应力损失值σ_{l5}、σ'_{l5}可按下列方法确定：

1 一般情况：

先张法构件：

$$\sigma_{l5}=\frac{60+340\frac{\sigma_{\mathrm{p}}}{f_{\mathrm{cu}}}}{1+15\rho} \tag{5.2.12-1}$$

$$\sigma'_{l5}=\frac{60+340\frac{\sigma'_{\mathrm{pc}}}{f_{\mathrm{cu}}}}{1+15\rho'} \tag{5.2.12-2}$$

2 后张法构件：

$$\sigma_{l5}=\frac{55+300\frac{\sigma_{\mathrm{pc}}}{f_{\mathrm{cu}}}}{1+15\rho} \tag{5.2.12-3}$$

$$\sigma'_{l5}=\frac{55+300\frac{\sigma'_{\mathrm{pc}}}{f_{\mathrm{cu}}}}{1+15\rho'} \tag{5.2.12-4}$$

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

f'_{cu}——施加预应力时的混凝土立方体抗压强度；

ρ、ρ'——受拉区、受压区预应力筋和普通钢筋的配筋率：对先张法 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。

【条文说明】根据国内对混凝土收缩、徐变的试验研究，应考虑预应力筋和普通钢筋的配筋率对 0i5 值的影响，其影响可通过构件的总配筋率ρ（$\rho=\rho_p+\rho_s$）反映。在公式（5.2.12-1）~公式（5.2.12-4）中，分别给出先张法和后张法两类构件受拉区及受压区预应力筋处的混凝士收缩和徐变引起的预应力损失。公式反映了上述各项因素的影响。此计算方法比仅按预应力筋合力点处的混凝土法向预应力计算预应力损失的方法更为合理。此外，考虑到现浇后张预应力混凝十施加预应力的时间比 28d 龄期有所提前等因素，对上述收缩和徐变计算公式中的有关项在数值上作了调整。调整的依据为：预加力时混凝土龄期，先张法取 7d，后张法取 14d;理论厚度均取 200mm;相对湿度为 40%~70%，预加力后至使用荷载作用前延续的时间取 1 年的收缩应变和徐变系数终极值。

5.3 结构计算

承载力极限状态计算

5.3.1 缓粘结预应力混凝土构件在施工阶段需要进行承载力计算时，预应力筋设计强度f_{py}应取预应力筋的应力设计值σ_{pu}，σ_{pu}可按本规程第 5.3.2 条确定。

【条文说明】 缓粘结预应力混凝土结构在缓粘结剂固化前，受力和无粘结预应力混凝土结构是一样的，因此，专用粘合剂固化前进行计算时可按无粘结预应力混凝土结构的方法计算。本规程第 5.3.4 条~第 5.3.9 条的计算公式中，当按无粘结预应力计算时，可以把公式中的 f_{py}换为σ_{pu}。

5.3.2 在进行正截面承载力计算时，专用粘合剂固化前缓粘结预应力筋的应力设计值σ_{pu}，应符合下列规定：

1 缓粘结预应力筋的应力设计值σ_{pu}宜按下列公式计算：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + \Delta\sigma_p \tag{5.3.2-1}$$

$$\Delta\sigma_p = (240 - 335\xi_P)(0.45 + 5.5\frac{h}{l_0})\frac{l_2}{l_1} \tag{5.3.2-2}$$

2 对于跨数不小于 3 跨的连续梁、连续单向板及连续双向板，$\Delta\sigma_p$取值不应小于 50N/mm^2；

3 综合配筋特征值ξ_P可按下列规定计算：

矩形截面受弯构件以及受压区高度小于翼缘高度的 T 形、I 形截面受弯构件：

$$\xi_P = \frac{\sigma_{\mathrm{pc}}A_{\mathrm{p}} + f_{\mathrm{y}}A_{\mathrm{s}}}{f_c b h_{\mathrm{p}}} \tag{5.3.2-3}$$

受压区高度大于翼缘高度的 T 形、I 形截面受弯构件：

$$\xi_P = \frac{\sigma_{\mathrm{pc}}A_{\mathrm{p}} + f_{\mathrm{y}}A_{\mathrm{s}} - f_c\,(b_f^{'} - b)\,h_f^{'}}{f_c b h_{\mathrm{p}}} \tag{5.3.2-4}$$

4 缓粘结剂固化前预应力筋的应力设计值σ_{pu}尚应符合下式规定：

$$\sigma_{\mathrm{pu}} \leqslant f_{\mathrm{py}} \tag{5.3.2-5}$$

式中：σ_{pe}——扣除全部预应力损失后，缓粘结预应力筋中的有效预应力（N/mm^2）；

$\Delta\sigma_p$——缓粘结预应力筋中的应力增量（N/mm2）；

f_{y}——非预应力筋抗拉强度设计值（N/mm2）；

f——混凝土轴心抗压强度设计值（N/mm2）；

ξ_P——综合配筋特征值，不宜大于 0.4；对于连续梁、板，取各跨内支座和跨中截面综合配筋特征值的平均值；

l_0——受弯构件计算跨度（mm）；

h——受弯构件截面高度（mm）；

h_{p}——缓粘结预应力筋合力点至截面受压边缘的距离

l_1——连续缓粘结预应力筋两个锚固端间的总长度（mm）；

l_2——与 41 相关的由施工荷载或活荷载最不利布置图确定的荷载跨长度之和（mm）；

$h_f^{'}$——T 形、I 形截面受压区的翼缘高度（mm）；

$b_f^{'}$——T 形、I 形截面受压区的翼缘计算宽度（mm）。

【条文说明】本条参考了国家现行标准《混凝土结构设计规范》GB50010 和《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ92 的有关规定。

5.3.3 纵向受拉钢筋屈服与受压区混凝土破坏同时发生时的相对界限受压区高度ξ_b应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定计算。

【条文说明】 缓粘结预应力混凝土结构截面相对界限受压区高度按有粘结预应力确定。

5.3.4 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公式规定（图 5.3.4）：

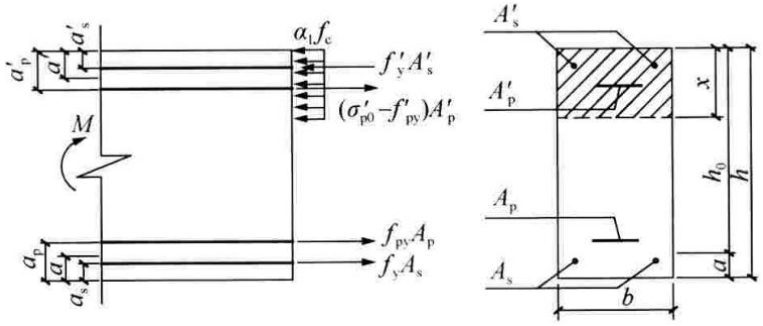


图 5.3.4 矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算

$$M \leqslant \alpha_1 f_c b x\left(h_0-\frac{x}{2}\right)+f_y^{'}A_s^{'}\left(h_0-a_s^{'}\right)- \left(\sigma_{p0}^{'}-f_{py}^{'}\right)A_p^{'}\left(h_0-a_p^{'}\right) \tag{5.3.4-1}$$

混凝土受压区高度应按下式确定：

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s - f_y^{'}A_s^{'}+f_{py}A_p+\left(\sigma_{p0}^{'}-f_{py}^{'}\right)A_p^{'} \tag{5.3.4-2}$$

混凝土受压区高度尚应符合下列条件：

$$x \leqslant \xi_b h_0 \tag{5.3.4-3}$$

$$x \geqslant 2a^{'} \tag{5.3.4-4}$$

式中：M——弯矩设计值（N·mm），考虑次内力组合；

$f_y^{'}$——非预应力筋抗压强度设计值（N/mm2）；

f_{py}、$f_{py}^{'}$——缓粘结预应力筋抗拉、抗压强度设计值（N/mm2）；

α_1——系数，当混凝土强度等级不超过 C50 时，取 1.0；当混凝土强度等级为 C80 时，取 0.94，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（mm2）；

A_p、$A_p^{'}$——受拉区、受压区纵向预应力筋的截面面积（mm2）；

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（N/mm2）；

b——矩形截面的宽度或倒 T 形截面的腹板宽度（mm）；

h_0——截面有效高度（mm）；

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

a'——受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离（mm），当受压区未配置纵向预应力筋或受压区纵向预应力筋应力（$\sigma'_{p0}-f'_{py}$）为拉应力时，公式（5.3.4-4）中的a'用a'_s代替。

5.3.5 翼缘位于受压区的 T 形、I 形截面受弯构件（图 5.3.5），其正截面受弯承载力应分别符合下列规定：

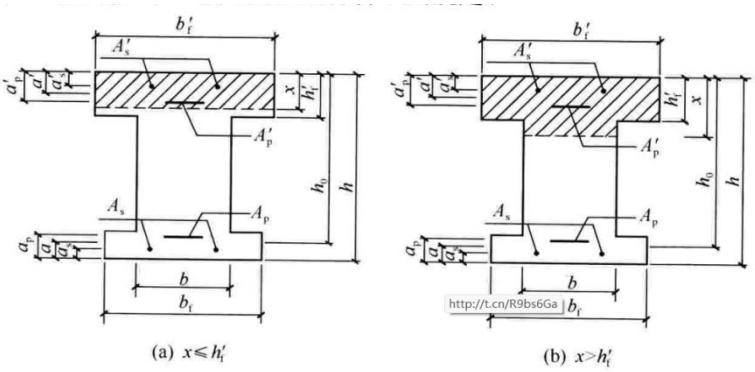


图 5.3.5 1 形截面受弯构件受压区高度位置

1 当满足下式时，应按宽度为 b 的矩形截面计算：

$$f_y A_s + f_{py} A_p \leqslant \alpha_1 f_c b'_f h'_f + f'_y A'_s - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p \qquad (5.3.5\text{-}1)$$

2 当不满足公式（5.2.5-1）的条件时，应按下式计算：

$$M \leqslant \alpha_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + \alpha_1 f_c (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2}\right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p (h_0 - a'_p) \qquad (5.3.5\text{-}2)$$

3 混凝土受压区高度x应按下式计算，并应符合本规程公式（5.2.4-3）和公式（5.2.4-4）的要求：

$$\alpha_1 f_c [bx + (b'_f - b) h'_f] = f_y A_s - f'_y A'_s + f_{py} A_p + (\sigma'_{p0} - f'_{py}) A'_p \qquad (5.2.5\text{-}3)$$

式中：h'_f——T 形、I 形截面受压区的翼缘高度（mm）；

b'_f——T 形、I 形截面受压区的翼缘计算宽度（mm），按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定执行。

5.3.6 受弯构件正截面受弯承载力的计算，应符合本规程公式（5.3.4-3）的要求。当由构造要求或按正常使用极限状态验算要求配置的纵向受拉钢筋截面面积大于受弯承载力要求的配筋面积时，按本规程公式（5.3.4-2）或公式（5.3.5-3）计算的混凝土受压区高度 x，可仅计入受弯承载力条件所需的纵向受拉钢筋截面面积。

5.3.7 当计算中计入纵向普通受压钢筋时，应满足本规程公式（5.3.4-4）的条件；当不满足此条件时，正截面受弯承载力应符合下式规定：

$$M \leqslant f_{\mathrm{py}} A_{\mathrm{p}}\left(h-a_{\mathrm{p}}-a_{\mathrm{s}}^{'}\right)+f_{\mathrm{y}} A_{\mathrm{s}}\left(h-a_{\mathrm{s}}-a_{\mathrm{s}}^{'}\right)+\left(\sigma_{\mathrm{p0}}^{'}-f_{\mathrm{py}}^{'}\right) A_{\mathrm{p}}^{'}\left(a_{\mathrm{p}}^{'}-a_{\mathrm{s}}^{'}\right) \tag{5.3.7}$$

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（mm）。

【条文说明】5.3.4~5.3.7 缓粘结预应力混凝土结构弯曲承载力计算公式均参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 给出，注意当缓粘结剂没有完全固化时预应力筋的设计强度f_{py}应取σ_{pu}。

5.3.8 矩形、T 形和 I 形截面的预应力混凝土受弯构件，其受剪截面尺寸要求及受剪承载力应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。

【条文说明】缓粘结预应力混凝土结构受剪承载力均可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 计算，注意当缓粘结剂没有完全固化时预应力筋的设计强度f_{py}应取σ_{pu}。

5.3.9 矩形、T 形和 I 形截面的预应力受弯构件，当符合下式的要求时，均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筛筋：

$$V \leqslant \alpha_{\mathrm{cv}} f_t b h_0+0.05 N_{\mathrm{p0}} \tag{5.3.9}$$

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

5.3.10 缓粘结预应力混凝土板柱结构板柱节点受冲切承载力计算应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的规定。当板柱节点附近板有开洞时，应考虑洞口的影响；板柱结构在竖向荷载、水平荷载作用下，当考虑板柱节点临界截面上的剪应力传递不平衡弯矩时，集中反力设计值应取等效集中反力设计值。

【条文说明】现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 对预应力混凝土平板的受冲切承载力计算作出了具体的规定，包括冲切面附近有洞口的情况、板柱节点存在不平衡弯矩时的受冲切承载力计算原则。由于板柱节点传递不平衡弯矩时，其受力特性及破坏形态较为复杂，《混凝土结构设计规范》GB50010-2010 附录 F 规定了计算方法。

5.3.11 缓粘结预应力混凝土正截面受压、正截面受拉、受弯构件的斜截面受弯承载力计算以及承受疲劳荷载的疲劳验算均应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 规定执行。

【条文说明】缓粘结预应力主要用在受弯构件，也可以用在受压构件、受拉构件等。受压构件、受拉构件以及斜截面受弯承载力计算和疲劳验算，由于用的机会较少，规程没有专门给出计算公式，可以按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 规定的计算方法计算，注意当缓粘结剂没有完全固化时预应力筋的设计强度f_{py}应取σ_{pu}。

正常使用极限状态验算

5.3.12 缓粘结预应力混凝土构件，应按下列规定进行受拉边缘应力或正截面裂缝宽度验算：

1 一级裂缝控制等级构件，在荷载标准组合下，受拉边缘应力应符合下式规定：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0 \qquad (5.3.12\text{-}1)$$

2 二级裂缝控制等级构件，在荷载标准组合下，受拉边缘应力应符合下式规定：

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \qquad (5.3.12\text{-}2)$$

3 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式规定：

$$\omega_{max} \leq \omega_{lim} \qquad (5.3.12\text{-}3)$$

对于环境类别为二 a 类的预应力混凝土构件，在荷载准永久组合下，受拉边缘应力尚应符合下式规定：

$$\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \qquad (5.3.12\text{-}4)$$

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拉应力（N/mm2）；

σ_{pc}——扣除相应阶段预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力（N/mm2）；

f_{tk}——混凝土轴心抗拉强度标准值（N/mm2）；

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（mm）；

ω_{lim}——最大裂缝宽度限值（mm）。

【条文说明】 缓粘结预应力钢绞线有缓粘结剂和外包高密度聚乙烯护套，与有粘结和无粘结预应力相比，其耐久性会有很好的改善，但是，由于缓粘结预应力混凝土结构耐久性研究较少，因此，本规程还是按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 给出裂缝控制的准则。

5.3.13 在矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面的缓粘结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ω（mm），可按下列公式计算：

$$w_{max} = \alpha_{\mathrm{cr}} \psi \frac{\sigma_{\mathrm{sk}}}{E_{\mathrm{s}}} \left(1.9 c_{\mathrm{s}} + 0.08 \frac{d_{\mathrm{eq}}}{\rho_{\mathrm{te}}} \right)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{\mathrm{tk}}}{\rho_{\mathrm{te}} \sigma_{\mathrm{sk}}}$$

$$d_{\mathrm{eq}} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i v_i d_i}$$

缓粘结剂固化前：

$$\rho_{\mathrm{te}} = \frac{A_{\mathrm{s}}}{A_{\mathrm{te}}}$$

缓粘结剂固化后：

$$\rho_{\mathrm{te}} = \frac{A_{\mathrm{s}} + A_{\mathrm{p}}}{A_{\mathrm{te}}}$$

式中：α_{cr}——构件受力特征系数，对受弯、偏心受压构件取 1.5，轴心受拉构件取 2.2；

ψ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数，当$\psi \leq 0.2$ 时，取Φ=0.2 当$\psi > 1.0$ 时和对直

接承受重复荷载的构件，取$\psi = 1.0$；

σ_{sk}——按荷载效应的标准组合计算的缓粘结预应力混凝土构件纵向受拉钢筋的等效应力（N/mm^2），按本规程第 5.3.14 条计算；

E_s——钢筋弹性模量（N/mm^2）；

c_s——最外层纵向受拉非预应力筋外边缘至受拉区底边的距离（mm），当$c_s \le 20$ 时，取$c_s = 20$；当$c_s \ge 65$，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，缓粘结剂固化前，仅取纵向受拉普通钢筋计算配筋率；在最大裂缝宽度计算中，当ρ_{te} <0.01 时，取ρ_{te} =0.01；

A_{te}——有效受拉混凝土截面面积（mm2），对轴心受拉构件，取构件截 面；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——受拉区纵向非预应力筋截面面积（mm2）；

A_p——受拉区缓粘结预应力筋截面面积（mm2）；

d_{eq}——受拉区纵向受拉非预应力筋的等效直径（mm），缓粘结剂固化 前，仅考虑受拉区纵向普通钢筋；缓粘结剂固化后，应考虑预应力钢绞线；

d_i——受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径（mm）；缓粘结剂固化后，预应 力钢绞线束的直径取为$\sqrt{n_1}d_{p1}$，其中d_{p1}为单根钢绞线的公称直径，n_1为单束钢绞线的根数；

n_1——受拉区第 i 种纵向受拉钢筋的根数；对于缓粘结预应力钢绞线束，当缓粘结剂固化后，取为钢绞线束数；

v_i——受拉区第 i 种纵向受拉钢筋的相对粘结特性系数，对光面钢筋， 取$v_i = 0.7$；对带肋钢筋，取$v_i = 1.0$；对缓粘结预应力钢绞线，专用粘合剂固化后，取$v_i = 0.4$。

【条文说明】参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 给出裂缝计算公式，在计算受拉区纵向受拉非预应力钢筋的等效直径时，预应力筋按束计算其公称直径。缓粘结预应力钢绞线的粘结特性系数取 0.4，比有粘结预应力钢绞线的 0.5 略低，是根据缓粘结预应力钢绞线的粘结锚固试验定量确定，并且也与环氧涂层钢绞线的粘结特性系数 0.4 一致。

缓粘结预应力钢绞线与 150mm 混凝土试块之间粘结长度 75mm，采用 C40 混凝土，测得预应力筋与混凝土之间的粘结力可达到 20kN，滑移量在 0.2mm 时，粘结力达到 10kN，说明缓粘结预应力筋能有效和混凝土产生粘结力（2）。另外，缓结预应力混凝土梁的受弯试验也证明了缓粘结预应力混凝土梁的裂缝分布与有粘结预应力混凝土梁裂缝分布基本是一致的，试验研究表明，环氧涂层钢筋混凝土的裂缝宽度略有增大，裂缝间距增大约 10%，因此，考虑粘结特性系数由有粘结的 0.5 降低为 0.4，这也是缓粘结预应力混凝土结构区别于有粘结预应力混凝土结构和无粘结预应力混凝土结构的重要标志之一。

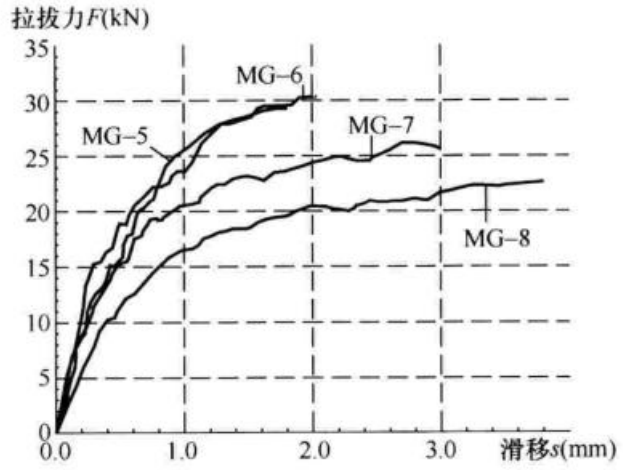


图 2 结力与滑移量之间的关系

5.3.14 在荷载效应的标准组合下，缓粘结预应力混凝土构件受拉区纵向钢筋等效应力σ_{sk}可按下列公式计算：

1 轴心受拉构件：

$$\sigma_{sk}=\frac{M_k-N_{p0}}{A_p+A_s}$$

2 受弯构件：

$$\sigma_{sk}=\frac{M_k-N_{p0}(z-e_p)}{(\alpha_p A_p+A_s)z}$$

$$e=e_p+\frac{M_k}{N_{P0}}$$

$$e_p=y_{ps}-e_{p0}$$

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

式中：A_p——受拉区预应力筋截面面积（mm2）：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；

e_p——混凝土法向应力等于零时预加力 N1 的作用点至受拉区纵向预应力筋和非预应力筋合力点的距离（mm）；

e ——等效轴向压力作用点至受拉区纵向预应力筋和非预应力筋合力点的距离（mm）；

y_{ps}——受拉区纵向预应力筋和非预应力筋合力点的偏心距（mm）；

e_{p0}——计算截面上混凝土法向预应力等于零时预加力N_{p0}作用点的 偏心距；

z——受拉区纵向非预应力筋和预应力筋的合力点至截面受压区合力点的距离（mm）；

N_k、M_k——按荷载效应的标准组合计算的轴向力值（N）、弯矩值（N·mm），超静定结构考虑次内力组合；

N_{p0}——预应力构件混凝土法向预应力等于零时的预应力（N）；

γ_f'——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值；考虑缓粘结剂固化影响的预应力筋等

效折减系数，缓粘结剂固化前取 0.3，固化后取 1.0。

【条文说明】本条参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 相关规定，给出了缓粘结预应力混凝土构件受拉区纵向钢筋的等效应力计算公式。注意在计算受弯构件受拉区纵向钢筋等效应力时考虑了缓粘结剂的固化与否，用预应力筋等效折减系数&表示，固化前取缓粘结预应力筋面积的 0.3，固化后取 1.0.公式（5.3.3-3）是将截面等效为轴力为 N、弯矩为 M 的偏压构件计算。

5.3.15 在荷载标准组合和准永久组合下，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：

1 轴向受拉构件：

$$\sigma_{ck} = \frac{N_k}{A_0}$$

$$\sigma_{cq} = \frac{N_q}{A_0}$$

2 受弯构件

$$\sigma_{ck} = \frac{M_k}{W_0}$$

$$\sigma_{cq} = \frac{M_q}{W_0}$$

3 偏心受拉和偏心受压构件：

$$\sigma_{ck} = \frac{M_k}{W_0} + \frac{N_k}{A_0}$$

$$\sigma_{cq} = \frac{M_q}{W_0} + \frac{N_q}{A_0}$$

式中： A_0——构件换算截面面积（mm2）；

W_0——构件换算截面的弹性抵抗矩（mm3）；

N_q、M_q——按荷载效应的准永久组合计算的轴向力值（N）弯矩（N·mm）。

5.3.16 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，其刚度取值及挠度限值应符合下列规定：

1 在等截面构件中，可假定各同号弯矩区段内的刚度相等，并取用该区段内最大弯矩处的刚度。当计算跨度内的支座截面刚度不大于跨中截面刚度的 2 倍或不小于跨中截面刚度的 1/2 时，该跨也可按等刚度构件进行计算，其构件刚度可取跨中最大弯矩截面的刚度。

2 受弯构件的挠度应按荷载效应标准组合并考虑荷载长期作用影响的刚度 B 进行计算，所求得的挠度计算值不应超过本规程第 4.1.9 条规定的限值。

【条文说明】本条参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 相关条文编写，在正常使用极限状态下混凝土受弯构件的挠度，主要取决于构件的刚度。假定在同号弯矩区段内的刚度相等，并取该区段内最大弯矩处所对应的刚度，对于允许出现裂缝的构件，它就是该区段内的最小刚度，这样计算是

偏于安全的。当支座截面刚度与跨中截面刚度之比在本规程规定的范围内时，采用等刚度计算构件挠度，其误差一般不超过 5%。

5.3.17 矩形、T 形、倒 T 形和 I 形截面的缓粘结预应力混凝土受弯构件考虑荷载长期作用影响的刚度B可按下式计算：

$$B = \frac{M_{\mathrm{k}}}{M_{\mathrm{q}}(\theta - 1) + M} B_{\mathrm{s}}$$

式中：M_{k}——按荷载效应的标准组合计算的弯矩值（N·mm），取计算区段内的最大弯矩值；

M_{q}——按荷载效应的准永久组合计算的弯矩值（N·mm），取计算区段内的最大弯矩值；

θ——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数，取 2.0；

B_{s}——荷载效应的标准组合作用下受弯构件的短期刚度（N·mm^2），按本规程第 5.3.18 条的公式计算。

【条文说明】 预应力混凝土受弯构件考虑荷载长期作用影响的刚度采用在荷载标准组合计算的短期刚度值 B 基础上考虑荷载长期作用影响的方法。

5.3.18 在荷载效应的标准组合作用下，缓粘结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，对施加预应力时预拉区出现裂缝的构件，B_s应降低 10%：

1 要求不出现裂缝的构件：

$$B_{\mathrm{s}} = 0.85 E_{\mathrm{c}} I_0$$

2 允许出现裂缝的构件：

$$B_{\mathrm{s}} = \frac{0.85 E_{\mathrm{c}} I_0}{k_{\mathrm{cr}} + (1 - k_{\mathrm{cr}})\omega}$$

$$k_{\mathrm{cr}} = \frac{M_{\mathrm{cr}}}{M_{\mathrm{k}}}$$

$$\omega = \left(1.0 + \frac{0.21}{\alpha_{\mathrm{E}}\rho}\right)(1 + 0.45\gamma_{\mathrm{f}}) - 0.7$$

$$M_{\mathrm{cr}} = \left(\sigma_{\mathrm{pc}} + \gamma f_{\mathrm{tk}}\right) W_0$$

$$\gamma_{\mathrm{f}} = \frac{(b_{\mathrm{f}} - b)h_{\mathrm{f}}}{bh_0}$$

式中：I_0——换算截面惯性矩（mm^4）；

E_{c}——混凝土弹性模量（N/mm?）；

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，取（$\alpha_{\mathrm{p}}A_p + A_s$）/（$bh_0$），缓粘结剂固化前取$\alpha_{\mathrm{p}}$=0.3，固化后取$\alpha_{\mathrm{p}}$=1.0；

M_{cr}——受弯构件的正截面开裂弯矩值（N·mm）；

γ_{f}——受拉翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值；

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/625140022323012011