

预应力混凝土设计 技术与工程 实例

高承勇 张家华 编著
张德锋 王绍义

YUYINGLI HUNNINGTU SHEJI JISHU YU GONGCHENG SHILI



中国建筑工业出版社

预应力混凝土设计技术 与工程实例

高承勇 张家华 编著
张德锋 王绍义

中国建筑工业出版社

主要编著人员：高承勇 张家华

张德锋 王绍义 秦卫红 肖 丽 惠 卓 李大伟

主要编写单位：上海现代建筑设计（集团）有限公司

上海市建筑科学研究院（集团）有限公司

东南大学

上海市建设科技推广中心

序

改革开放以来，我国基本建设的发展日新月异，建成了大量基础设施。这些基础设施不仅满足了我国经济社会快速发展的需求，而且相当一部分工程技术含量很高，反映了当前国际建设科技水平，在其中我们看到了预应力技术在关键之处的应用。实践证明，预应力技术是当今技术最先进、用途最广、效益最高、最有发展前景的结构新技术之一。近些年来，预应力技术在电视塔、核反应堆、大直径筒仓等特种结构以及预制拼装结构中也得到推广应用，它们必将进一步提升我国建筑业科技水平。

纵观预应力混凝土技术在我国的发展，它的应用已从较为简单的结构构件、静定结构、迅速扩展到以对整体结构施加预应力为特点的超静定结构。譬如，在房屋结构方面，形成预应力框架结构体系、预应力平板结构体系、预应力转换层结构体系、预应力空间结构体系等，同时，预应力技术也拓展到特种结构、钢结构、结构加固、基础工程等方面。目前，我国土木工程预应力技术与世界发展基本同步，技术的推广应用持续高速增长，一些有代表性论著的相继出现，以及预应力相关规范和技术标准的逐步完善。这些成绩的取得离不开政府建设行政主管部门对预应力发展的行业指导，离不开一直致力于预应力技术研究和应用的土木工程界科技人员的辛勤汗水。

应该看到预应力混凝土结构的设计和施工技术含量相对较高、牵涉面较广、头绪较多、对相关设计人员要求相对较高。上海建设行政主管部门在统筹大规模建设中十分重视预应力技术的推广应用，下达过一系列关于预应力技术应用方面的项目、课题，其中包括由上海现代建设设计（集团）有限公司承担研究、总结关于预应力混凝土设计技术方面的课题，其成果用于指导设计人员加深对相关设计规范的理解，解决预应力混凝土技术在设计环节的难题。在上述工作的基础上，他们编撰了这本很有特色的《预应力混凝土设计技术和工程实例》。该书以上海现代建筑设计（集团）有限公司为主编单位，还邀请了上海市建筑科学研究院（集团）有限公司、东南大学、上海市建设科技推广中心等单位共同参加编写。历经数年的努力工作，他们从这些单位的研究成果和设计经验中精挑细选，汇编成书。

该书按工程设计主要设计阶段（方案、扩初、施工图阶段）对预应力混凝土结构设计不同深度的要求展开，主要包括预应力基本概念、材料、锚夹具、预应力混凝土结构基本设计原则和问题、结构方案设计与估算、预应力损失计算、耐久性设计、抗震设计、各类结构体系的设计要点、构造要求、图纸表达等。为方便设计人员理解和应用，书中附有近年来在上海实践的一些预应力工程实例，如浦东国际机场二期航站楼工程等；还在附带光盘中免费提供了预应力混凝土截面设计工具软件，以及关于预应力损失计算的一些工具表格等。

作为研究和工程实践的总结，本书内容系统丰富、涵盖面广、具有较强的实用性。我

深信，本书的出版不仅可以帮助设计人员进一步了解预应力技术发展动态、理解相关设计规范、理清预应力设计头绪、解决设计难题、掌握好各阶段设计及图纸表达深度，对熟练掌握、灵活应用预应力混凝土技术起到积极作用；而且对预应力施工、科研和教学人员亦有裨益。

吕志伟

2009年10月26日于东南大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 预应力基本概念	1
1.2 预应力混凝土结构的分类	4
1.3 预应力混凝土应用简介	6
第 2 章 材料、锚夹具	15
2.1 预应力钢筋的种类及其选用.....	15
2.2 预应力钢筋的标准强度和设计强度.....	24
2.3 预应力钢筋质量的检验.....	25
2.4 预应力筋用锚具连接器的种类及选用.....	26
2.5 高强高性能混凝土.....	31
2.6 制孔材料.....	32
2.7 灌浆材料.....	33
2.8 预应力构件修复补强用材料.....	34
第 3 章 预应力混凝土结构基本设计原则	36
3.1 关于预应力作用性质的分类.....	36
3.2 关于预应力效应的考虑.....	36
3.3 关于预应力混凝土构件承载力.....	37
3.4 严格控制预应力混凝土中的氯离子含量.....	37
3.5 预应力混凝土抗震问题.....	37
3.6 严禁使预应力筋经受高温.....	40
3.7 做好锚具或连接器的防护.....	40
3.8 体外预应力索的防腐.....	41
3.9 施工对结构的影响.....	42
第 4 章 方案设计阶段预应力混凝土结构设计	43
4.1 方案设计阶段有关抗震选型与控制.....	43
4.2 预应力混凝土结构方案设计与估算.....	45
4.3 方案设计阶段不同结构体系设计要点.....	56
第 5 章 初步设计阶段预应力混凝土结构设计	80
5.1 作用效应组合.....	80
5.2 预应力抗震设计.....	80
5.3 预应力损失计算.....	84
5.4 预应力效应的分析与计算.....	92
5.5 预应力混凝土结构的防火设计.....	99
5.6 预应力结构的耐久性设计	101

5.7	初步设计阶段不同结构体系设计要点	103
5.8	预应力平法表达	139
第6章	施工图阶段预应力混凝土结构设计	141
6.1	正常使用极限状态验算	141
6.2	承载能力极限状态的计算	153
6.3	预应力混凝土结构的防火设计	188
6.4	施工图阶段设计计算书内容	191
6.5	设计图纸表达	192
第7章	预应力混凝土结构构造设计	198
7.1	预应力混凝土结构一般构造	198
7.2	预应力锚固区节点构造	206
7.3	预应力筋的连接和搭接方式	216
7.4	体外预应力构造	217
7.5	各种结构体系中的配筋构造	219
第8章	预应力混凝土工程实例	235
8.1	预应力技术在框架中的应用——浦东国际机场二期航站楼 工程预应力设计和施工	235
8.2	预应力技术在框架和连续梁中的应用——蒲汇塘停车列检库工程	238
8.3	预应力技术在板柱结构中的应用	244
8.4	现浇预应力混凝土空心楼板设计与施工	248
8.5	预应力技术在大活载工程中的应用——上海市外高桥 保税物流园区国际物流中心仓储工程	253
8.6	预应力技术在现代物流仓库中的应用	255
8.7	超长预应力索在地下室外墙裂缝控制中的应用	261
8.8	预应力混凝土无梁楼盖的应用——金桥 S4 公寓预应力混凝土 无梁楼盖的设计	267
8.9	体外预应力连续梁的受力特点及体外预应力筋计算 强度试验研究	272
8.10	板柱结构的预应力楼板挠度计算	276
参考文献		283

第 1 章 绪 论

1.1 预应力基本概念

1.1.1 预应力混凝土的定义

所谓预应力混凝土结构，是将混凝土结构在承受外荷载以前，预先采用某种人为的方法在其内部造成一种应力状态，使结构在使用阶段将要受拉的区域先受到压应力的一类结构。这项压应力可以部分或全部抵消混凝土结构使用阶段产生的拉应力，所以对混凝土结构施加预应力可以改善钢筋混凝土结构的使用性能，推迟裂缝的出现和限制裂缝的开展，提高结构的刚度。从而扩大了钢筋混凝土结构的应用范围。

为了便于更加全面地认识预应力的作用，对预应力混凝土结构，通常可以从以下三个方面来进行理解^[1~7]：

(1) 第一种理解——预加应力使混凝土由脆性材料成为弹性材料

这个概念是将预应力混凝土看作一种弹性混凝土材料，即预应力的作用是把混凝土由原先抗拉弱抗压强的脆性材料变为一种既能抗压又能抗拉的弹性材料。此时的混凝土可看作受到两个力系的作用，即内部预应力和外部荷载。预应力产生的预压力可部分或全部抵消外部荷载产生的拉应力，从而保证了混凝土在正常使用状态下不产生裂缝，甚至使混凝土全截面受压（全预应力混凝土结构）。只要不产生裂缝，内部预应力和外部荷载作用下所产生的混凝土的应力、应变及挠度则均可按弹性材料的计算公式考虑，并在需要时进行叠加。

(2) 第二种理解——预加应力充分发挥了高强钢材的作用，使其与混凝土能共同工作

这个概念是将预应力混凝土看作是一种能够将高强钢材和混凝土有效结合、充分利用的钢筋混凝土。与普通钢筋混凝土一样，它也是通过钢材承受拉力、混凝土承受压力以形成力偶，来抵抗外弯矩。但是，如果将高强钢筋也像普通钢筋混凝土的钢筋那样简单地浇筑在混凝土体内，若想使其强度能够充分发挥，则钢筋周围的混凝土必将随着钢筋的伸长而出现严重开裂，构件将出现不能容许的宽裂缝和大挠度。因此，为了使高强钢筋的强度能够充分被利用，使其达到足够的伸长量，必须在其与混凝土结合前预先张拉。由此可知，预应力混凝土可以实现对高强钢材的充分利用，可看成是钢筋混凝土应用的扩展和改进。

不论是预应力还是普通配筋的混凝土，其内部抵抗力偶都必须靠钢筋受拉和混凝土受压来提供，因此，预应力混凝土并不能超越材料本身的强度极限。在确定预应力混凝土构件极限承载力时利用的即是这个概念。

(3) 第三种理解——预加应力平衡了结构外荷载

这个概念是将预应力筋的作用视为外力，其对结构的效应主要看作是为了平衡构件上

的部分或全部的外荷载，以使受弯构件如板、梁在给定的荷载条件下将不受挠曲应力。如果外荷载对梁各截面产生的力矩均恰被预加力所产生的力矩抵消，那么一个受弯为主的构件就可以转换成一轴心受压的构件。如果外荷载超过预加力所产生的反向荷载效应，则可用荷载差值来计算梁截面的应力，该方法大大简化了复杂难解的预应力混凝土的设计与分析，尤其适用于分析超静定预应力混凝土梁。

上述第一种概念将预应力混凝土看作弹性材料，使得我们可以采用弹性的方法分析全预应力混凝土；第二种概念从材料强度的角度理解预应力混凝土，预应力混凝土是混凝土结构与预应力的结合，其结构强度本身应取决于组成材料的强度，不能超越材料本身的强度极限；第三种概念将预应力的施加，看成是为了实现荷载平衡，为复杂预应力混凝土结构的设计与分析提供了简捷的方法。这三种不同的概念之间并没有相互的矛盾，只是从不同的角度对预应力混凝土的原理和概念进行了诠释。

1.1.2 预应力混凝土结构特点

预应力混凝土结构具有下列主要优点^[1,3,5]：

1.1.2.1 改善了结构的使用性能

(1) 提高了构件的抗裂能力。因为承受外荷载之前预应力混凝土构件的受拉区已有预压应力存在，所以在外荷载作用下，只有当混凝土的预应力被全部抵消转而受拉且拉应变超过混凝土的极限拉应变时，构件才会开裂。而普通钢筋混凝土结构中不存在预应力，其开裂荷载的大小仅由混凝土极限抗拉强度（约为抗压强度的 1/10 左右）所决定，因而抗裂能力很低。

(2) 增大了构件的刚度，减少了构件的挠度。预应力混凝土构件正常使用时，在荷载效应标准组合下可能不开裂或只有很小的裂缝，混凝土基本上处于弹性阶段工作，因而构件的刚度比普通钢筋混凝土构件有所增大。预应力等效荷载产生的反拱可以部分或完全抵消荷载产生的挠度，所以预应力受弯构件的挠度相对于普通混凝土构件有大幅度的降低。

1.1.2.2 节约材料，降低造价

如前所述，普通钢筋混凝土构件不能充分利用高强度材料。而预应力混凝土构件中，预应力钢筋因从预拉到结构受荷、结构破坏等各阶段始终处于高拉应力状态，即能够有效利用高强度钢筋；从承载能力的概念讲，采用高强度等级的钢筋，可以减小需要的截面面积。与此同时，为与高强度钢筋相配合，预应力混凝土结构应该尽可能采用高强度等级的混凝土，于是可以获得较经济的构件截面尺寸。

综上，对适合采用预应力技术的混凝土结构来说，预应力混凝土结构较普通混凝土结构可节省 20%~40% 的混凝土和 30%~60% 的纵向钢筋。

1.1.2.3 增强结构耐久性，结构质量安全可靠

由于预应力可以防止或延缓混凝土开裂，或可以把裂缝宽度限制到无害的程度，从而可以提高结构耐久性。而且，预应力混凝土结构开裂后具有良好的裂缝闭合性能与变形恢复能力，当工程师合理地选择预应力程度，可使荷载标准组合下可能产生的裂缝在荷载的长期效应组合下重新自行闭合，这样可以大大提高预应力混凝土结构的耐久性水平。

1.1.2.4 扩大了混凝土构件的应用范围

由于预应力混凝土改善了构件的抗裂性能，因而可用于有防水、抗渗透及抗腐蚀要求

的环境；采用高强度材料，结构轻巧，刚度大，变形小，可用于大跨度、重荷载及承受反复荷载的结构。

预应力混凝土已广泛地应用于工业与民用建筑及交通运输建设中。例如预应力空心楼板、屋面板、屋面大梁、屋架、吊车梁、预应力桥梁、铁路轨枕等。在水工建筑中也已用来修建码头、栈桥、桩、闸门、调度室、压力水管、渡槽、圆形水池、工作桥、公路桥、水电站厂房的屋面梁及吊车梁等结构构件，也可用预应力的方法来加固大坝、衬砌隧洞。对于某些有独特要求的结构，例如需防止海水腐蚀的海上采油平台，需耐高温高压的核电站大型压力容器等，采用预应力混凝土结构更有它的优越性，而非其他结构所能比拟。

1.1.2.5 能促进结构新材料、新体系的发展

由于预应力的应用，一些新型体系才得以建立，如装配式预应力结构体系等。所谓装配式预应力结构，就是将工厂加工的梁、柱等预制构件或梁、柱预应力预制构件搬运到现场，再将支承钢管等构件临时拼装定位后，通过对钢绞线及预应力钢棒的张拉挤压而形成的整体结构体系。预应力的应用为预制构件的装配提供了一种可靠的连接手段，促进了装配式结构新体系与施工方法的发展。同时，通过预应力的合理施加，结构的抗震性能也能得到改善。国外已有的研究表明，通过把钢绞线最大张拉强度降低到 $0.5P_y$ 左右，可使梁柱节点在中小型地震作用时，仍然保持刚性节点的力学特性，在大地震作用时，可使梁柱结合处由于一定范围的相对自由转动而形成暂时的间隙，从而使梁柱节点损伤得以大幅度地抑制。受此影响，结构整体的塑性残余变形也能够得到最大限度的减小。该结构体系形象地被称之为“关节式装配预应力结构”。在地震能吸收问题上，由于同样存在预应力结构的不足，因此可以结合软钢消能系统，形成关节式装配预应力混合结构^[41]。

近年来非钢材预应力筋材得到很大发展，它们主要是纤维加筋塑料预应力筋，如碳纤维加筋塑料（CFRP）预应力筋，玻璃纤维加筋塑料（GFRP）、芳纶纤维加筋塑料（AFRP）及玄武岩纤维预应力筋（BFRP）。它们具有轻质、高强（强度接近或大于预应力钢筋）、耐腐蚀、抗疲劳、非电磁等优点，表面形态可以是光滑的、螺纹或网状的，形状包括棒状、绞线形及编织物形。可以预见，随着研究的不断深入和应用的不断扩展，这些材料工艺的改善、价格的合理化以及性能的稳定性等各方面因素均将得到很大提高。

尽管预应力混凝土结构有如上所述的诸多优点，但也存在一定的局限性，因而并不能完全代替普通钢筋混凝土构件。预应力混凝土具有施工工序多、对施工技术要求高且需要张拉设备、锚夹具及劳动力费用高等特点，因此其特别适用于普通钢筋混凝土构件力不能及的情形（如大跨度及重荷载结构）；而普通钢筋混凝土构件由于施工较方便、造价较低等特点，应用于允许带裂缝工作的一般工程结构，仍具有强大的生命力。

综上，预应力结构发展的特征是预应力新技术、新材料与结构新体系的结合。随着高性能预应力材料（高强混凝土、高强预应力筋、新型纤维塑料筋等）的推广应用以及结构设计理论和设计的不断发展，新型、高效预应力结构体系将在我国 21 世纪大规模基本建设中发挥越来越大的作用。

1.1.3 预应力度

工程上常用预应力度来表达预应力混凝土结构构件施加预应力的强弱程度。常见表达方法有以下几种^[22,23,42]：

1.1.3.1 按消压状态定义预应力度

对受弯构件

$$\lambda = \frac{M_0}{M} \quad (1-1)$$

$$M_0 = \sigma_{pc} W_0 \quad (1-2)$$

对轴心受拉构件

$$\lambda = \frac{N_0}{N} \quad (1-3)$$

$$N_0 = \sigma_{pc} A_0 \quad (1-4)$$

式中 M_0 ——消压弯矩，使控制截面在荷载作用下受拉边缘混凝土应力抵消到零时的弯矩；

M ——荷载（不包括预应力）效应标准组合下控制截面的弯矩；

W_0 ——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

N_0 ——消压轴心拉力，截面混凝土应力抵消到零时的轴心拉力；

N ——荷载效应标准组合下截面的轴心拉力；

σ_{pc} ——由预加应力产生的混凝土抗裂验算边缘法向应力；

A_0 ——构件换算截面面积。

按此定义，当 $\lambda \geq 1$ 时，理论上表示截面不出现拉应力或不开裂；当 $\lambda < 1$ ，表示截面出现拉应力或开裂。

1.1.3.2 按配筋强度比定义预应力度

按受弯构件或受拉构件中预应力筋承担的承载力占总承载力的比例来定义预应力度：

$$\lambda = \frac{A_p f_{py} h_p}{A_p f_{py} h_p + A_s f_y h_s} \quad (1-5)$$

式中 A_p 、 A_s ——预应力和非预应力筋的截面面积；

f_{py} 、 f_y ——预应力和非预应力筋的抗拉强度设计值。

按此定义， $\lambda \leq 1$ ；当 $\lambda = 1$ 时，表示构件纵筋全部为预应力钢筋。此种预应力度虽与构件的使用性能没有直接关系，但它适用于判别预应力构件的截面延性和抗震性能。

两种预应力度定义，第一种以抗裂度为基础，第二种以承载力为基础，两种定义有一定的关系。从抗裂度看，第一种定义的概念比较明确，而第二种定义使用方便，在实际应用中往往多使用此种定义方法。

1.2 预应力混凝土结构的分类

预应力混凝土结构按施工工艺、预应力度和预应力筋的位置以及预应力筋有、无粘结可作如下分类^[22,29,42]：

1.2.1 按施工工艺分类

预应力混凝土根据施加预应力工艺的不同，可分为先张法和后张法两种：

先张法（图 1-1）指在浇筑混凝土构件之前将预应力筋张拉到设计控制应力，采用夹具将其临时固定在永久或临时台座，待混凝土达到设计强度或龄期后，将施加在预应力筋

上的拉力逐渐释放，在预应力筋回缩的过程中利用其与混凝土之间的粘结力，对混凝土施加预压应力。先张法主要用于工厂或者现场预制的中小型预应力构件的预应力张拉。

后张法（图 1-2）指浇筑混凝土构件前，在预应力筋的位置预留出相应孔道，浇筑混凝土并待其强度达到要求后（一般为设计值的 75% 以上），利用预设在混凝土构件内的孔道穿入预应力筋，以混凝土构件本身为支承来张拉预应力筋，并用特制锚具将预应力筋锚固形成永久预加力，最后在预应力筋孔道内压注水泥浆防锈，并使预应力筋和混凝土粘结成整体。

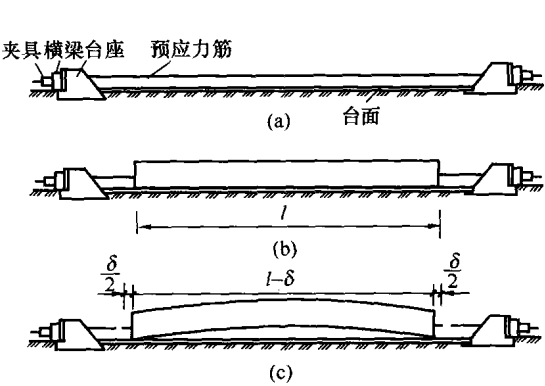


图 1-1 先张法施工工艺

(a) 张拉预应力筋；(b) 浇筑混凝土构件；
(c) 放张施加预应力

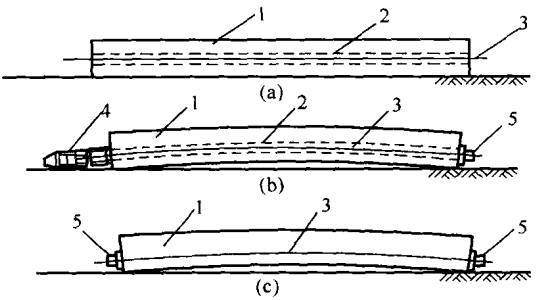


图 1-2 后张法施工工艺

(a) 制作混凝土构件；(b) 张拉钢筋；
(c) 锚固和孔道灌浆
1—混凝土构件；2—预留孔道；
3—预应力筋；4—千斤顶；5—锚具

后张预应力混凝土构件的优点为施工时不需要台座，利用波纹管预留孔道时，可以根据需要调整预应力筋的线型，故可以根据结构受力特点，调整预应力筋的形状和位置。但后张预应力与先张法相比，需要永久铺具，构造和施工工艺较复杂，成本较高，一般适用于大型预应力构件或者结构的现场张拉。

1.2.2 按预应力度分类

根据正常使用极限状态对裂缝的控制状态可分为：(1) 全预应力：构件中沿预应力方向没有达到消压极限状态；(2) 部分预应力：容许混凝土构件中存在不超过设计限值的弯曲拉应力；(3) 没有施加预应力的钢筋混凝土。表 1-1 所示为用预应力度度的表达方式，将混凝土结构分为全预应力混凝土、部分预应力混凝土和钢筋混凝土三类。

预应力混凝土构件的分类			表 1-1
构件分类	预应力度	裂缝控制等级	构件受拉边缘混凝土应力
全预应力混凝土构件	$\lambda \geq 1$	一级——严格要求不出现裂缝的构件	按荷载效应的标准组合计算时，不出现拉应力，即 $\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0$
部分预应力混凝土构件	$1 > \lambda > 0$	二级——一般要求不出现裂缝的构件	按荷载效应的准永久组合计算时，不出现拉应力，即 $\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq 0$ 按荷载标准组合计算时，控制拉应力在一定范围内，即 $\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk}$
钢筋混凝土构件	$\lambda = 0$	三级——允许出现裂缝的构件	最大裂缝宽度按荷载标准组合并考虑准永久的影响进行计算，不大于允许值

1.2.3 按预应力筋与构件的相对位置分类

预应力筋位于混凝土构件内部的称为体内预应力混凝土。先张预应力混凝土以及在构件内部预设孔道穿筋的后张预应力混凝土等均属此类。

预应力筋位于混凝土构件体外的预应力混凝土称为体外预应力混凝土。

1.2.4 按预应力筋有无粘结分类

对于后张、体内预应力混凝土，按预应力筋与周边混凝土之间的粘结情况，可分为有粘结预应力混凝土与无粘结预应力混凝土。

有粘结预应力混凝土，是指预应力筋完全或部分与周围混凝土或水泥砂浆粘结、握裹在一起的预应力混凝土。先张预应力混凝土以及在构件内部预设孔道穿筋的后张预应力混凝土等均属此类。

无粘结预应力混凝土，是指预应力筋不与混凝土或水泥砂浆粘结，伸缩变形相对自由的预应力混凝土。这种预应力混凝土可采用的预应力筋全长涂有特制的防锈油脂，并外套防老化的塑料管保护来实现。

无粘结预应力混凝土结构体系的优点是无需留孔与灌浆，施工简单，摩擦阻力小，预应力筋可多跨曲线布置等。但在截面弯曲破坏时预应力筋的强度不能充分发挥，对锚具的质量要求也较高。鉴于上述特点，无粘结预应力一般会用在截面高度较小的预应力平板或者预应力框架扁梁中。而截面高度较大的预应力框架大梁或者连续梁则采用有粘结预应力混凝土结构。

在水下或高腐蚀环境中的结构构件、人防结构中不应采用无粘结预应力混凝土结构。

随着有粘结预应力混凝土技术的发展，最近又出现了后期粘结的有粘结预应力混凝土（或称缓粘结预应力混凝土）。后期粘结 PC 钢材是在 PC 钢材上涂抹硬化的黄油状的常温硬化型树脂，以套管包裹。这种常温硬化型树脂，通过控制环氧树脂硬化促进剂的添加量，可以自由确定硬化时间。这种树脂在硬化时，与无粘结钢材一样，具有与黄油状同等的黏度，张拉后，PC 钢材与套管之间充填的环氧树脂自然硬化，介于套管间的 PC 钢材同混凝土粘结起来。后期粘结预应力混凝土结合了无粘结与有粘结预应力的特点，具有施工容易、耐腐蚀性好和使用性能好等优点。

1.3 预应力混凝土应用简介

1.3.1 预应力混凝土的应用

预应力的基本原理大概在几世纪以前就已有应用，当时是以绳索或铁箍缠绕桶板做桶。当箍被张紧时，箍受到预拉力，转而在桶板之间产生预压力，这样就使它们能够抵抗内部液压所产生的环向拉力。换句话说，箍和桶板在它们受任何工作荷载作用之前，都已作用有预应力。在圆形水池上作用预应力就像木桶加箍一样。当桶一段时间没有使用之后会出现漏水现象，这是因为本来张紧的箍由于桶板的干缩而使得预拉力减小，此时只需将桶放在水里浸一段时间或者敲紧桶箍即可。生活中类似的事例还有很多，预先张紧的自行

车车轮的辐条，木锯在使用时需要在另一侧用绳子拧紧，等等。

在工程中对混凝土施加预应力的设想在 100 多年前就有人提出了，而预应力混凝土却是在大约 20 世纪 30 年代，出现高强钢材和锚具且充分认识了混凝土的收缩徐变之后才开始得到实际应用。

预应力混凝土的早期应用，主要集中在建筑业、桥梁和轨枕、电杆、水池等结构、构件，即用它来代替钢结构、构件以及改进普通钢筋混凝土结构、构件。近二三十年，已经逐步扩大到居住建筑、大跨和大空间公共建筑、高层建筑、高耸结构、地下结构、海洋结构、压力容器、大吨位围船结构及机场跑道路面结构等各个领域。这里简要介绍近年来几种典型预应力混凝土技术在工程中的应用实例：

1.3.1.1 后张预应力混凝土框架和门架结构的应用

预应力混凝土框架结构多用于建造工业与民用多层建筑，能解决大跨、重载等的需求，可以实现生产工艺布置灵活等优点，故能取得较好的经济和社会效益。其中，上海金山腈纶厂主厂房框架梁跨度达 36m，梁高 1.8m，无锡国棉四厂主厂房跨度为 22.5m+21.3m，开间 14.3m，柱网为最大；云南玉溪体育馆中轴线主刚架跨度达 78m^[4]。

在高层建筑楼板中，若采用预应力扁梁，可达到降低层高的目的。该结构的钢材和混凝土用量比一般预应力梁略费一些。

例如：江苏吴江新达丝织厂工业大楼是一幢用于丝绸加工的高层工业厂房，结构平面如图 1-3 所示，标准柱网为 7.2m×7.2m。该工程原设计为地上 14 层，地下 1 层的普通钢筋混凝土框架—剪力墙结构体系。根据业主要求，要在总建筑高度不变的条件下，增加楼层数，扩大使用面积，即增加为地上 15 层。为此必须设法降低楼层结构层的高度，结构采用预应力扁梁结构体系，该工程采用的宽扁梁高跨比为 1/24，宽高比为 5。使用此结构方案除了能有效达到增层的目的外，更具有良好的技术经济指标和结构受力特性上的优越性^[209]。利用预应力扁梁的实际工程还包括：北京中宜大厦、成都海发商厦、广州新白云国际机场航站楼等。

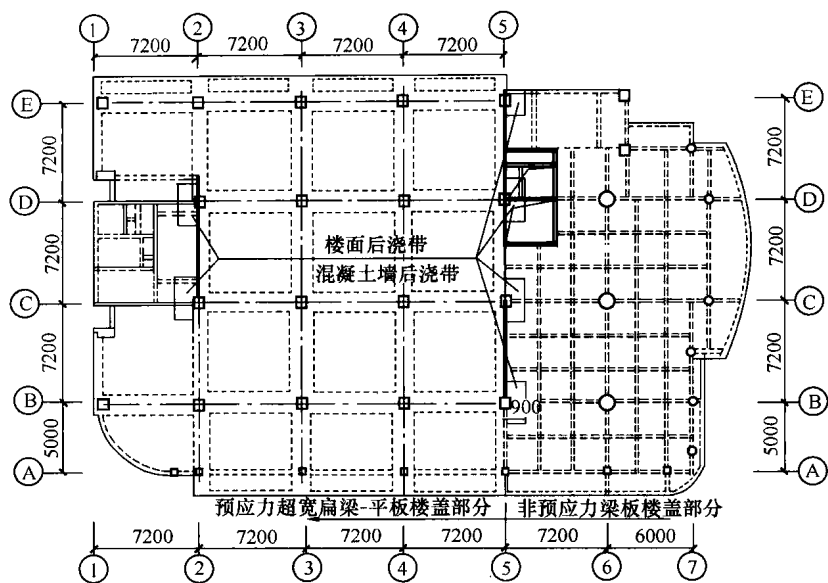
门架结构适合于大跨度、大柱网、大空间、结构布置灵活的公共建筑和工业厂房等；在门架结构中施加预应力可以达到结构重量轻、用料省、施工方便（速度快）、技术经济指标较好等目的。例如，珠海玻纤厂工程为一大跨度 4 跨预应力门式刚架结构（31.5m+33m+31.5m+14m）。原设计为钢结构方案，后将其改为多跨预应力混凝土门式刚架结构，并提出了连续配筋方案。该方案采用后，节约钢材和造价达 40%^[210]。

1.3.1.2 预应力混凝土楼盖结构的应用

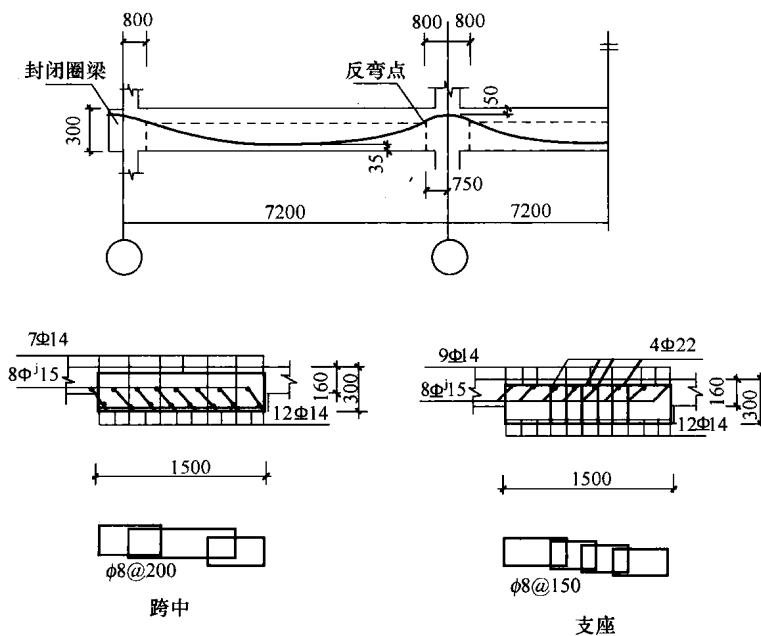
预应力楼盖适合建造大柱网、大开间、大空间的高层及超高层建筑楼盖。近十几年来，为了适应这种需要，预应力混凝土楼盖结构技术得到迅速发展，带来了较好的经济和社会效益^[4]。

预应力混凝土叠合楼盖结构在楼盖、屋盖中，尤其在高层及大跨度工业与民用建筑中应用经济效果非常显著。我国部分或全部采用叠合结构的工程包含：北京国际大厦（33 层，高 101m）、昆仑饭店（30 层、高 99.9m）、西苑饭店，武汉金源世界中心（28 层，97.5m）、伟鹏大厦、汉正商都、武泰闸农副产品中心批发市场等。

1987 年施工的北京科技活动中心学术报告厅的顶板结构为大空间承重体系，采用纵、



(a)



(b)

图 1-3 江苏吴江新达丝织厂预应力扁梁结构

(a) 结构平面图; (b) 扁梁配筋图

横双向各 4 根 27m 跨无粘结预应力井字梁结构^[211]。

1.3.1.3 预应力混凝土转换层结构的应用

在高层建筑转换层中应用预应力则更能发挥预应力混凝土的优点。

其中梁式转换层具有传力直接、明确和传力途径清楚的优点。转换梁具有受力性能好、工作可靠、构造简单和施工方便的优点，结构计算也相对容易。工程实例包括：采用预应力混凝土普通梁式转换层的南京状元楼工程、国内外首次采用预应力混凝土曲梁转换层结构的江苏省公安厅交通指挥中心综合楼工程、采用预应力转换短梁的苏州中银惠龙大厦等。其中，南京状元楼酒店扩建工程总建筑面积 31000m²。主楼地上 12 层，局部退层，总高 45m，标准层面积 2300m²，裙楼地上 3~7 层，主楼和裙楼设 1 层地下室。选用框架结构体系，主楼 4 层以下设有商场、大堂、餐厅、文化娱乐等公共设施，5 层以上均为客房。在 4 层以下，主楼采用两跨框架，裙楼采用单跨框架，在 5 层以上采用三跨框架，采用预应力混凝土开洞大梁作为转换大梁，结构剖面图如图 1-4 所示^[212]。

江苏省公安厅交通指挥中心大楼位于南京市扬州路，共 18 层，总建筑面积 15220m²。平面为等腰三角形，其锐角为 39°。第 4 层为一扇形大会议厅，跨度较大，该层上下皆为小跨度的办公用房，因此在第 4 层设置了两根曲线预应力混凝土转换梁，直线长度分别为 17m、13m，上部结构（14 层）的荷载通过两根柱子传到

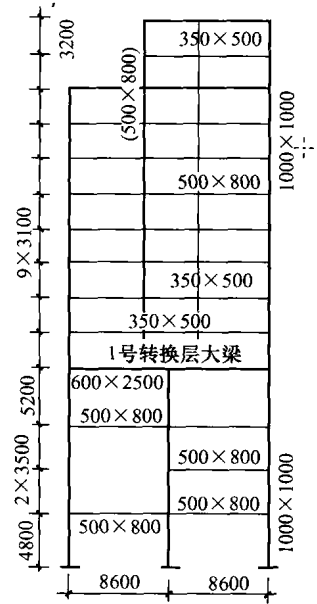


图 1-4 南京状元楼酒店
预应力转换层结构剖面

转换梁上^[46]（图 1-5）。

板式转换层^[52]给上部结构的布置带来方便，但也使板的传力变得不清楚，受力变得复杂，结构计算相对困难。在地震作用下，相邻上、下层受到很大的作用力，容易发生震害。

采用板式转换层的实际工程：南京娄子巷小区（四期）高层公寓住宅采用 2m 厚预应力混凝土转换板。南京新世纪广场一期工程采用板厚 2m 预应力混凝土转换板、承托 30 层。深圳福田彩虹大厦板厚 2.4m、承托 31 层。保定康乐广场工程板厚 1.71m，承托 22 层。其中，保定

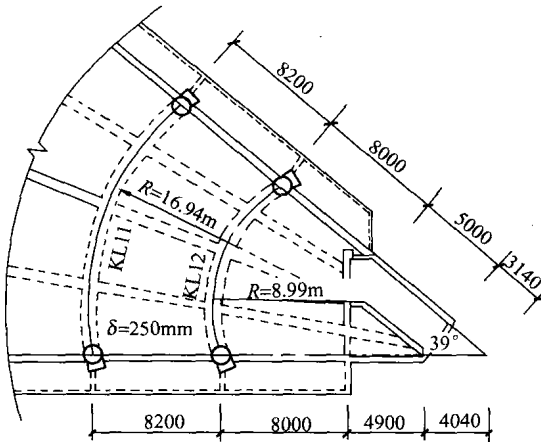


图 1-5 结构平面布置（局部）

市康乐广场地面以上 25 层，塔顶高度 83.8m，建筑面积 49300m²，地下 1 层为停车场，2 层裙房，层高 5.1m 及 4.0m，柱网尺寸分别为 6m×8.4m 和 7m×8.4m，采用框剪结构，混凝土强度等级为 C40，建筑功能为商场。2 层以上是住宅标准层，层高 2.9m，采用剪力墙结构（3~10 层混凝土强度等级为 C35，10 层以上混凝土强度等级为 C30），以保证

住户房间无梁无柱,使用方便。由于工程结构形式复杂,不仅转换层上下的结构形式不同,而且下部柱网轴线和上部楼层的轴线完全错开,因此在第3层采用预应力厚板转换层,板厚1.71m,混凝土强度等级为C45。塔楼剖面见图1-6^[213]。

桁架转换层传力明确,传力途径清楚,但构造和施工复杂。另外,转换桁架不仅使开洞与设置管道具有条件,而且它们的位置与大小也有很大的灵活性,使充分利用转换层的建筑空间成为可能。具有桁架转换层的高层建筑,其质量和刚度的突变要比带转换梁的高层建筑缓和,因此,地震反应要比带转换梁的高层建筑小得多。

采用桁架转换层的高层结构包括:上海水产大厦、南京新世纪广场(二期工程)、上海铁路大厦工程、广东南海瑞安花园等。其中,上海水产大厦结构采用框架—剪力墙(筒体)体系,两端为现浇钢筋混凝土筒体,中间为柱网12.6m×8.5m的框架,因建筑功能改变,在6层以上纵向采用3.7~3.8m小柱网,横向柱网不变,需在6层设置结构转换层,转换层上、下各层平面见图1-7,转换桁架的布置见图1-8^[214]。

1.3.1.4 预应力空心楼板体系的应用

2008年北京奥运会射击馆采用钢筋混凝土框架结构,地上3层,其中资格赛馆主体结构东西长266m、南北宽37m(首层57m)。按射击比赛项目和建筑设计要求,将10m靶场设在3层,其下部为50m和25m靶比赛场地,楼盖南北向跨度达23.7m(图1-9)。为了保证下层比赛场地的建筑空间,不允许设置框架梁柱,需要通过大跨楼板的方式来满足空间要求。为了达到这一要求并有效减轻结构自重使结构体系更加合理,此部分楼盖结构采用现浇混凝土预应力空心板结构技术^[43]。

1.3.1.5 预应力核电安全壳的应用

为防核辐射及事故情况下核放射性物质的泄漏,大亚湾核电站共设置3道屏障,反应堆安全壳为最外层屏障,其形状为一直径38.8m、高60.35m的圆柱形筒体和近半球形穹顶组成,为现浇后张预应力钢筋混凝土结构。安全壳预应力钢束分为水平、竖向和穹顶3个系统(图1-10)^[44]。

1.3.1.6 预应力混凝土基础的应用

超高层建筑的浅埋筏基和具有多层地下结构的深埋筏基已成为经常采用的结构形式之一。根据多年来在无粘结预应力楼盖体系应用方面的实践,近几年在北京天元大厦工程、和平里综合楼工程及首都机场航站楼工程的筏型基础中完成了无粘结预应力技术的应用,

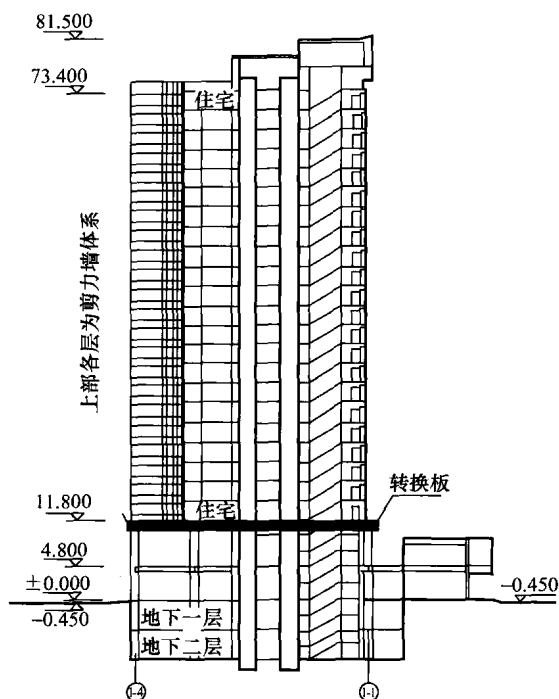


图1-6 保定康乐广场厚板转换层结构剖面