

现代预应力混凝土结构

杜拱辰 编著

中国建筑工业出版社

现代预应力混凝土结构

杜拱辰 编著

中国建筑工业出版社

本书系统地论述了预应力混凝土结构的基本性能和基本理论,既包括传统的内容,如高强钢材与高强混凝土的物理力学性能,预应力工艺和损失值,以容许应力为基础的弹性分析,弹塑性抗弯强度分析和设计等;也包括近年来国内外的最新成就,如部分预应力开裂截面分析,挠度与裂缝的控制,等效荷载与荷载平衡法,非线性全过程分析,以及无粘结筋极限应力的计算等内容。

本书可供土建结构设计、施工和科研工程技术人员及大专院校有关师生参考。

现代预应力混凝土结构

杜拱辰 编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 15 字数: 402 千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷

印数: 1—12,470册 定价: 6.15 元

ISBN7—112—00306—7/TU·200

统一书号: 15040·5507

序 言

早在19世纪后期，就有不少学者提出对混凝土施加预应力的设想，但直到本世纪20年代后期经由著名的法国工程师弗雷西奈的努力，预应力混凝土方进入实用阶段。第二次世界大战结束时，西欧由于遭受严重破坏而急待重建，但当时钢材供应极为紧张，作为节约材料的措施。预应力混凝土乃开始在土建工程中大量推广。

起初，预应力混凝土主要用于桥梁、厂房屋面、储仓、罐、管、轨枕，电杆和桩等结构和构件，后来逐步扩大到居住建筑、公用建筑、高层建筑、高耸结构、地下结构、海洋结构、压力容器和大吨位船舶结构等各个方面。目前，预应力混凝土已成为土建工程的主要结构材料之一，它的应用不再是简单地代替钢结构、木结构和钢筋混凝土结构，而且出现了一些独特的结构形式、结构体系和施工方法，并开辟了一些非其它结构材料所能替代的应用领域。

我国的预应力混凝土是50年代中期随着第一个五年计划的迫切需要开始发展起来的。结合料贵工贱和高强钢材短缺的具体情况，我国预应力混凝土的发展走着一条不同于国外的独特的道路。我国主要采用中、低强钢材生产各种预应力混凝土构件，以代替量大面广的传统的中小跨度钢、木结构和钢筋混凝土结构构件，而高强钢材则用于跨度大或荷载重的一些桥梁和吊车梁等结构。这些中小型预应力混凝土构件，既可节约较多的钢材，又有利于降低成本，因而发展极为迅速。目前，举凡工业和民用建筑的屋盖和楼盖，大中跨桥梁、轨枕、压力水管、电杆和桩等结构及构件，极大部分都已采用了预应力混凝土。

按照传统的设计思想, 预应力混凝土和钢筋混凝土是截然不同的两种结构材料。预应力混凝土是一种不开裂的弹性新材料, 它的设计是以容许应力和弹性分析为基础的。近一、二十年来, 随着以良好的使用性能和合理的强度储备为设计准则的新概念日趋完善, 工程界已普遍认识到这种不容许混凝土承受拉应力的“全”预应力混凝土并不一定能满足使用性能的要求, 也不一定经济; 相反, 在全部工作荷载下, 容许受拉或开裂的“部分”预应力结构则往往更为经济合理, 有着广宽的发展前景。

随着部分预应力设计思想的传播和国产高强钢丝, 钢绞线产量的增加, 摆在我国工程界面前的迫切任务, 是如何采用高强钢材和先进的生产工艺以及先进的设计理论来生产高效预应力混凝土, 用以建造大开间, 大柱网、大空间无内柱的工业和民用建筑, 以及大、中跨桥梁和其它特种结构来满足“四化”建设的需要, 并为国家节约更多的钢材。形势的发展, 要求我国预应力技术工作者必须更好的掌握现代预应力混凝土的专业知识。

以往, 不少预应力混凝土教材是以规范条文和公式为基础编写的, 起到介绍和解释规范的作用。其优点是简单实用, 便于学习。但由于过分重视计算方法, 而对基本概念和基本理论却阐述较少。读者虽易于接受这些条文和公式, 但往往知其然而不知其所以然。既难深入理解所设计结构的特性与本质, 更不能逾越规范范围创造性地设计出能充分发挥预应力优越性的新颖结构。

为此本书突出写预应力混凝土的基本性能和基本理论, 特别是预应力结构直到极限荷载为止的强度和变形特性, 同时提供有关预应力结构用的高强钢材和高强混凝土, 生产工艺, 预应力损失值, 预应力连续结构等内容的必要知识。这些专业基础知识, 对全面、正确理解国内外规范和设计方法, 以及学习国外先进经验都会是十分必要的。

本书介绍的预应力混凝土结构构件的分析和设计方法, 主要取材于国际上有较大影响的一些文献资料。这些方法大都采用以理论为基础并经实践校正过的公式, 而不取用过分依靠实验数据

的经验公式。这些方法逻辑性强，推理清楚，概念明确，有利于读者对预应力混凝土基本原理的深入理解。至于“全”预应力与“部分”预应力，则当作加筋混凝土系列来统一处理，设计工程师可以根据工程需要灵活选用预应力度，设计出符合使用要求的各种预应力结构。

本书共分十四章，既包括传统的各项内容，如预应力用的高强材料，生产工艺及应力损失值，以容许应力为基础的弹性分析和弹塑性抗弯强度理论，挠度，剪切，受拉构件和连续结构等；也包括近年来的一些新成就，如可靠度理论，为部分预应力而附加的开裂截面分析和挠度、裂缝的控制，等效荷载和荷载平衡法，非线性全过程分析，以及无粘结筋极限应力的计算等。各章虽列有算例，但目的只是为了说明方法或公式，以加深读者对基本理论的认识。至于为方便设计计算而用的图表以及完整的设计实例都没有收入，因为这些资料都和设计规范紧密联系，也是不难找到的。作者深信，如果能对预应力混凝土结构的基本性能与基本理论有比较透彻的理解，在结合国内外规范进行设计时是不会有困难的，甚至还有可能对规范条款和设计方法做出正确评价，并能结合具体工程情况灵活处理有关技术问题。

本书系作者为研究生讲授预应力混凝土课程而逐步写成的，但大部分内容可作为大专院校高年级学生以及从事科研、设计、施工的土建技术人员，为进一步增加预应力混凝土知识的参考书。

本书第五章极限状态设计法系请李明顺同志写的。在各章的编写过程中，承杜文华、李明顺、胡德炘、陈永春、白生翔、刘永颐、陶学康等同志提出许多宝贵的修改意见，作者谨致以衷心的感谢！

本书还存在有不少缺点甚至错误，衷心希望读者提出批评和指正。

杜拱辰

1986年10月于中国建筑科学研究院

符 号

- A ——截面面积的统称;
- A_o ——混凝土毛截面面积;
- A_n ——混凝土净截面面积;
- A_p ——预应力筋截面面积;
- A_s ——非预应力受拉钢筋面积;
- A'_s ——非预应力受压钢筋面积;
- A_c ——混凝土换算截面面积;
- b ——截面受压边宽度;
- b_w ——有翼缘截面腹板宽度;
- C ——混凝土压应力合力或压力中心;
- c ——中性轴离顶面纤维的距离;
- $c.g.c$ ——混凝土截面的形心(中心,重心)线;
- $c.g.s$ ——预应力筋面积的重心(中心,形心)线;
- E_c ——混凝土弹性模量;
- E_p ——预应力钢材的弹性模量;
- E_s ——非预应力钢材的弹性模量;
- e ——预应力筋重心至截面 $c.g.c$ 的偏心距;
- f_c ——混凝土圆柱体抗压强度($\phi 150$, 高300mm),一般指28天龄期;
- f_{ci} ——传力时混凝土的圆柱体抗压强度;
- f_{cu} ——混凝土立方体强度($150 \times 150 \times 150\text{mm}$),一般指28天龄期;
- f_{pu} ——预应力钢材的抗拉强度;
- f_{py} ——预应力钢材的屈服强度;
- $f_{0.2}$ 或 $f_{0.1}$ ——相应于残余应变为0.2%或0.1%的条件屈服强度;
- f_r ——混凝土的弯拉强度(抗折模量,抗折强度);
- f_t ——混凝土抗拉强度;

$G(g)$ ——永久荷载（恒载）；
 h ——截面总高度 $= c_1 + c_2$ ；
 h_t, h_j ——工字形截面受压或受拉翼缘高度；
 h_p ——预应力筋重心离受压边缘的距离；
 h_s ——非预应力受拉钢筋重心离受压边缘的距离；
 I ——截面惯性矩的统称；
 I_{cr} ——开裂截面惯性矩；
 I_o, I_n ——不开裂截面惯性矩（毛截面、净截面）；
 I_o ——对截面 $c.g.c.$ 的惯性矩；
 I_t ——换算截面惯性矩；
 k_1, k_2 ——上、下核心点离 $c.g.c.$ 的距离 $= r^2/c_2$ 或 r^2/c_1 ；
 l ——梁（板）的跨度或长度；
 l_d ——发展长度；
 M ——力矩或弯矩的统称；
 M_{cr} ——截面的开裂弯矩；
 M_G ——梁（板）自重引起的力矩（包括传力时附加的恒载在内）；
 M_Q ——由活荷载引起的力矩；
 M_t ——全部荷载（恒载及活荷载）产生的力矩；
 M_u ——截面抗弯强度或极限弯矩；
 M_1, M_2 ——连续梁（板）的主弯矩与次弯矩；
 N ——轴向力的统称；
 N_{dec} ——引起预应力构件消压时的拉力；
 n_p —— E_p/E_c ；
 n_s —— E_s/E_c ；
 P ——预加力的总称；
 P_{con} ——张拉控制力或张拉力；
 P_e ——有效预加力或最终预加力（扣除全部短期和长期损失后剩余的预加力）；
 P_t ——传力前的预加力（未扣除混凝土弹性压缩损失）；
 P_0 ——传力刚完毕时的预加力（扣除全部瞬时损失）；
 $Q(q)$ ——可变荷载（活荷载等）；
 r ——截面回转半径 $= \sqrt{I/A}$ ；
 T ——预应力筋（或预应力与非预应力筋）中的总拉力或拉力中心；

T_p ——预应力筋中的总拉力;
 T_s ——非预应力筋中的总拉力;
 V ——剪力的统称;
 V_c ——混凝土能承担的总剪力(取 V_{ci} 和 V_{cw} 二者中的较小者);
 V_{ci} ——引起弯剪裂缝的总剪力;
 V_{cs} ——引起腹剪裂缝的总剪力;
 V_n ——名义极限抗剪强度 $\geq V_u/\phi$;
 V_p ——预应力筋(曲线或折线)的竖向分力;
 V_s ——剪力筋承担的总剪力;
 V_u ——乘以荷载系数后梁承受的总剪力;
 W ——截面抵抗矩;
 W_1 —— I/c_1 = 对顶纤维的截面抵抗矩;
 W_2 —— I/c_2 = 对底纤维的截面抵抗矩;
 w ——均布荷载;
 y ——任意一点离 $c.g.c.$ 线的距离;
 y_1 ——顶面纤维至截面形心($c.g.s$)的距离;
 y_2 ——底面纤维至截面形心($c.g.s$)的距离;
 Δ ——梁(板)的挠度;
 Δ' ——梁(板)的反拱(由预应力引起);
 Δ_s ——预应力筋的总伸长变形;
 ϵ_c ——混凝土的应变;
 ϵ_p ——预应力筋的应变;
 ϵ_{pe} ——相应于有效预应力 σ_{pe} 的应变;
 ϵ_s ——非预应力钢筋的应变;
 ϵ_u ——混凝土弯曲受压极限应变(常取用0.003);
 θ 或 α ——角的统称,预应力筋角度的改变;
 μ ——摩擦系数;
 ρ_p ——预应力筋配筋率;
 ρ_s ——非预应力受拉钢筋配筋率;
 σ ——应力的统称;
 σ_c ——混凝土法向应力;
 σ_{con} ——预应力筋张拉控制应力;
 σ_{pe} ——有效预应力;

目 录

符 号

第一章 绪 论	1
1-1 预应力的概念	1
1-2 发展简史和现状	3
1-3 预应力混凝土的原理	16
1-4 弹性阶段预应力筋的应力变化	26
1-5 偏心距和曲线筋	29
1-6 采用高强材料的必要性	33
1-7 预应力混凝土的分类	34
1-8 预应力混凝土的各受力阶段	36
1-9 预应力混凝土与钢筋混凝土的比较	38
第二章 材料	40
2-1 预应力钢材	40
2-2 钢筋的冷拉	41
2-3 钢材的应力-应变曲线	43
2-4 各种预应力钢材	45
2-5 钢材的松弛与徐变	53
2-6 钢材的疲劳	55
2-7 温度对钢材的影响	58
2-8 高强混凝土	60
2-9 混凝土的强度	61
2-10 混凝土的应力-应变曲线	70
2-11 混凝土的弹性模量	72
2-12 泊松系数	75
2-13 温度对混凝土的影响	75
2-14 混凝土的徐变	76

2-15	混凝土的收缩应变	78
第三章 预应力工艺		80
3-1	引言	80
3-2	先张法	81
3-3	后张法	88
3-4	无粘结预应力筋	106
第四章 预应力损失		108
4-1	引言	108
4-2	预应力损失的估算方法	111
4-3	总损失毛估值	115
4-4	混凝土的弹性压缩	118
4-5	锚固损失	122
4-6	摩擦损失	124
4-7	热养护损失	134
4-8	混凝土徐变损失	135
4-9	混凝土收缩损失	136
4-10	钢材的松弛损失	137
4-11	分项计算组合的总损失值	140
4-12	我国规范的损失计算	144
4-13	时间分段法计算总损失值	146
第五章 极限状态设计法		149
5-1	概述	149
5-2	极限状态	151
5-3	安全系数和可靠指标	152
5-4	设计表达式-荷载与材料强度标准值、分项安全系数	158
第六章 受弯截面弹性分析		164
6-1	引言	164
6-2	截面特征值的计算	165
6-3	预加力引起的混凝土应力	168
6-4	荷载引起的混凝土应力	177
6-5	压力线分析法	180
6-6	等效荷载分析法	186

6-7	预应力筋应力的变化	191
6-8	开裂弯矩	195
第七章 抗弯强度理论		199
7-1	概述	199
7-2	抗弯破坏形态	200
7-3	等效矩形应力块	203
7-4	应变协调分析	205
7-5	简化分析法	215
7-6	无粘结筋的极限应力	224
7-7	徐变和收缩损失的影响	229
第八章 开裂后阶段梁的抗弯性能		232
8-1	引言	232
8-2	开裂截面的弹性分析	232
8-3	开裂截面的消压分析法	239
8-4	弯矩-曲率全过程分析法(有粘结梁)	250
第九章 部分预应力及非预应力配筋		265
9-1	部分预应力及全预应力	265
9-2	部分预应力梁的荷载-挠度曲线	267
9-3	部分预应力与全预应力的比较	270
9-4	预应力混凝土按预应力度度的分类	272
9-5	非预应力筋的用途	275
9-6	非预应力筋应力的计算	277
9-7	无粘结部分预应力混凝土	281
第十章 受弯截面设计		291
10-1	引言	291
10-2	截面尺寸初步设计	291
10-3	弹性设计一般概念	295
10-4	弹性设计, 混凝土无拉应力	297
10-5	弹性设计, 混凝土允许有拉应力	305
10-6	极限设计	309
10-7	截面形状的选择	313
10-8	简支梁的布置	314

10-9 弹性设计的容许应力	318
第十一章 挠度、反拱、裂缝	322
11-1 引言	322
11-2 荷载-挠度曲线	324
11-3 不开裂构件的挠度	326
11-4 开裂构件的挠度	334
11-5 裂缝控制	343
第十二章 剪切、端部设计	350
12-1 剪切的一般考虑	350
12-2 剪力和主拉应力	354
12-3 斜裂缝剪力计算公式	355
12-4 剪力配筋	359
12-5 抗剪强度设计	362
12-6 端部区(后张构件)	371
12-7 端部区(先张构件)	382
第十三章 受拉构件	390
13-1 受拉构件的形状	390
13-2 预应力混凝土拉杆的优点	390
13-3 预应力混凝土受拉构件的性能	393
13-4 预应力拉杆的分析	395
第十四章 预应力连续梁	404
14-1 引言	404
14-2 连续梁的布置方案	405
14-3 弹性分析法	409
14-4 等效荷载分析法	417
14-5 线性变换	424
14-6 吻合束	428
14-7 荷载平衡法	430
14-8 预应力筋的实际曲线	441
14-9 连续梁的极限强度	445
参考文献	447

第一章 绪 论

1-1 预应力的概念

预应力是指为了改善结构或构件在各种使用条件下的工作性能和提高其强度而在使用前预先施加的永久性内应力。预应力这一术语的出现虽为时不长，然而人们对预应力原理的应用却由来已久，在日常生活中稍加注意是不难找到一些熟悉例子的。

木桶是一个很典型的例子。这种用竹箍的木桶（图1-1）在我国已有几千年的历史。当套紧竹箍时，竹箍因伸长而产生拉力，用木板拼成的桶壁则产生环向压力。如木板之间的预压应力大于水压产生的环向拉应力，木桶就不致开裂而漏水。

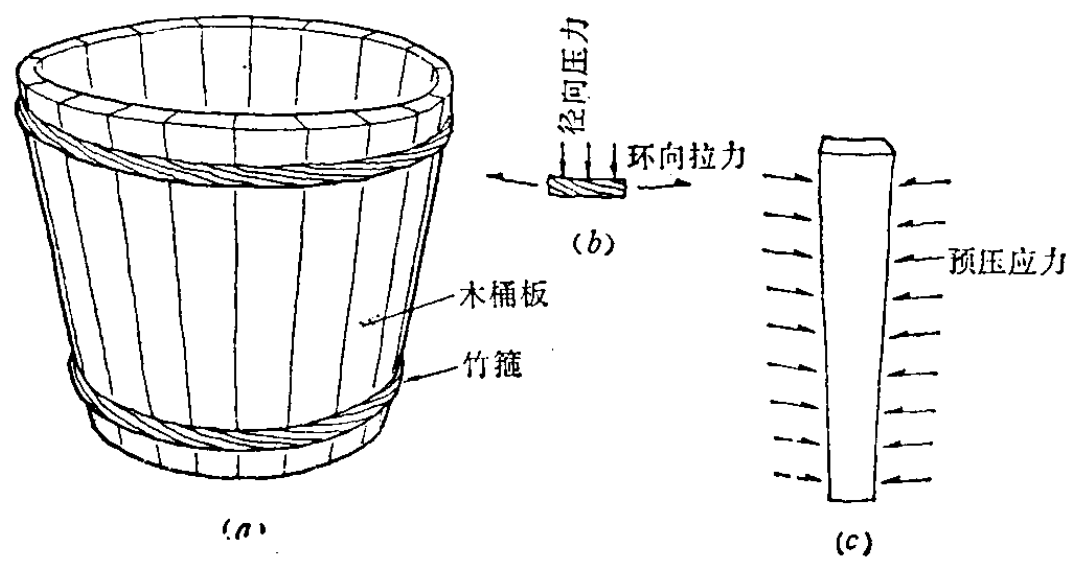


图 1-1 预应力原理在木桶上应用的示意图

(a)木桶；(b)竹箍分离体；(c)木桶板分离体

木锯是另一个典型的例子。当锯条来回运动锯割木材时，锯条的一部分受压而另一部分受拉。这种薄而长的锯条，本来就没有什么抗压能力，但由于拧紧绳子而受到预拉应力，只要这个预

拉应力不低于使用时引起的压应力，锯条就能正常工作而不致于发生压屈破坏。

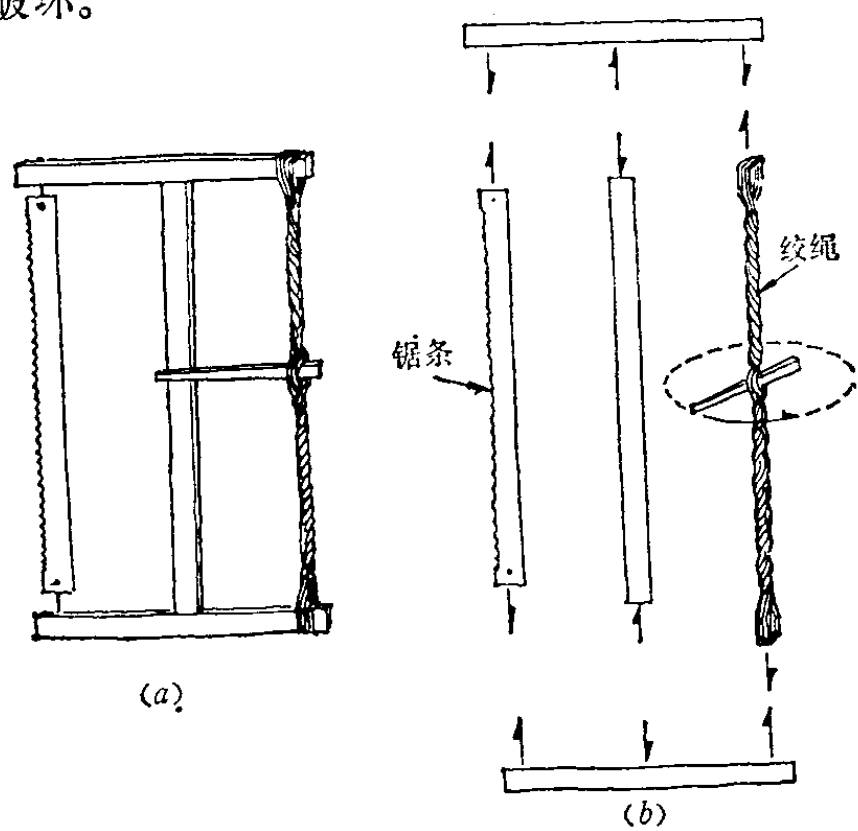


图 1-2 预应力原理在木锯上应用的示意图
(a)木锯；(b)木锯各杆件分离体

又如自行车车轮的辐条，就是利用预先收紧的拉应力来抵抗以后承受的压应力；而钢圈则由于承受收紧辐条的拉力而受压。同样，带拉索的无线电高耸桅杆，拉索也是利用预先施加的拉应力来抵抗使用时出现的压应力；桅杆则由于承受拉索的拉力而受压。

上述各例表明应用预应力的原理和技术，既可以用预压应力来提高结构的抗拉能力，又可以用预拉应力来提高结构的抗压能力。因此，只要善于运用，就能获得改善结构性能和提高结构强度的效果。

混凝土是一种抗压强度高而抗拉强度低的脆性结构材料，它的抗拉强度比抗压强度要低得多。因此，素混凝土用途不广，只适用于抗压而不适用于抗拉、抗弯的结构或构件。但如对混凝土构件的受拉部分预先施加压应力，用预压应力以抵消外荷作用下

所产生的拉应力，就可以克服混凝土抗拉强度过低的缺点。显然，这种拉、压强度相差悬殊的混凝土，是适合用预应力加强的一种理想材料。

1-2 发展简史和现状^{[1][2]}

预应力混凝土能发展到当前这样高度的水平，是由于过去一个世纪以来无数工程师和科学家继续不断钻研和实践的结果。回顾历史，预应力混凝土的概念几乎是与钢筋混凝土的概念同时产生的，无论采用钢筋还是施加预压应力，其目的都是为了加强混凝土的抗拉能力以弥补抗拉强度过低的缺点。将预应力原理用于混凝土的实践始于十九世纪八十年代。

1886年，美国的杰克森（P. H. Jackson）取得了用钢筋对混凝土拱进行张拉以制作楼板的专利。德国的陶林（W. Dohring）于1888年取得了用加有预应力的钢丝浇入混凝土中以制作板和梁的专利。这也是采用预应力筋制作混凝土预制构件的首次创议。

用预加应力以抵消荷载引起的应力的概念，是奥地利的孟特尔（J. Mandl）于1896年首先提出的。1906年德国的柯南（M. Koenen）进行了将张拉应力为60MPa的钢筋浇筑于混凝土中的实验，观察到混凝土的初始预压应力由于混凝土收缩而丧失的现象。1908年美国的斯坦纳（C. R. Steiner）提出两次张拉以减少预应力损失的建议并取得了专利。于混凝土强度较低的幼龄期进行第一次张拉以破坏钢筋与混凝土之间的粘结，于混凝土硬化后再二次张拉。奥地利的恩丕格（F. Emperger）于1923年创造了缠绕预应力钢丝以制作混凝土压力管的方法，钢丝应力为160~800MPa。

无粘结预应力筋是美国的迪尔（R. H. Dill）于1925年提出的。他采用涂隔离剂的高强钢筋，于混凝土结硬后进行张拉并用螺帽锚固。西德的费勃（R. Farber）于1927年取得了在混凝土中能滑动的无粘结预应力筋的专利。当时，防止钢材与混凝土粘

结的方法是：在钢材表面涂刷石蜡或将预应力筋放在铁皮套管或硬纸套管内。

以上所述预应力混凝土早期活动中提出的各种方法与专利，由于当时对混凝土和钢材在应力状态下的性能缺少认识，施加的预应力太小，效果不明显，所以都没有能得到推广应用。

预应力混凝土进入实用阶段与法国工程师弗雷西奈（F. Freyssinet）的贡献是分不开的。他在对混凝土和钢材性能进行大量研究和总结前人经验的基础上，考虑到混凝土收缩和徐变产生的损失，于1928年指出了预应力混凝土必须采用高强钢材和高强混凝土。弗氏这一论断是预应力混凝土在理论上的关键性突破。从此，对预应力混凝土的认识开始进入理性阶段，但对预应力混凝土的生产工艺，当时并没有解决。

1938年德国的霍友（E. Hoyer）研究成功靠高强细钢丝（直径0.5~2mm）和混凝土之间的粘结力而不靠锚头传力的先张法，可以在长达百米的墩式台座上一次同时生产多根构件。1939年，弗雷西奈研究成功锚固钢丝束的弗式锥形锚具及其配套的双作用张拉千斤顶。1940年，比利时的麦尼尔（G. Magnel）研究成功一次可以同时张拉两根钢丝的麦式楔块锚^[3]。这些成就为推广先张法与后张法预应力混凝土提供了切实可行的生产工艺。

预应力混凝土的大量推广，开始于第二次世界大战结束后的1945年。当时西欧由于战争对工业、交通、城市建设造成的大量破坏，急待恢复或重建，而钢材供应异常紧张，一些原来采用钢结构的工程，纷纷改用预应力混凝土结构代替，几年之内西欧和东欧各国都取得了蓬勃的发展。应用的范围，开始是桥梁和工业厂房，后来扩大到土木、建筑工程的各个领域。从50年代起，美国、加拿大、日本、澳大利亚等国也开始推广预应力混凝土。为了促进预应力技术的发展，1950年还成立了国际预应力混凝土协会（简称FIP），有四十多个会员国参加，每四年举行大会一次，交流各国在理论和实践方面的经验。