

# 预应力混凝土框架结构

## 实用设计方法

张 瀑 鲁兆红 淡 浩 编著

中国建筑工业出版社

# 预应力混凝土框架结构 实用设计方法

张 瀑 鲁兆红 淡 浩 编著

中国建筑工业出版社

本书共有 8 章，基于《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010，从预应力材料、预应力作用的分析、结构受弯承载能力极限状态设计、结构正常使用极限状态设计和施工阶段验算五个方面介绍了预应力结构的设计过程和要点。本书还提供了预应力框架梁的完整设计过程，而且对设计人员在预应力结构设计中的常见问题进行了归纳和解释。

在基于《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 提供计算方法的同时，本书还对预应力结构的计算过程提出了简化方法，并对不同方法的计算结果进行了对比，为读者提供了预应力结构设计的多种途径。

本书可供建筑设计人员参考使用，也可供高等院校结构工程专业的师生学习参考。

\* \* \*

责任编辑：万 李

责任设计：董建平

责任校对：张 颖 赵 颖

# 前 言

我国经济高速发展仍将持续相当长的时间，在经济发展的同时，一方面为了适应城市化进程的需要，在今后 20~30 年中需要完成大量的建设；另一方面，资源与环境因素正逐渐成为制约经济发展的关键要素，工程建设领域同样面临越来越大的节能减排的压力。根据有关资料的统计分析，建筑工程中，影响建造过程中能耗水平及二氧化碳排放量最重要的因素是建筑工程材料的消耗，因此，为了适应发展的需要，客观上要求我们在建设工程中应当选择能更有效地利用材料的方式来建造更多的建筑，以降低单位工程的能耗，预应力技术即是有效利用材料的有效途径之一。

在使用量最大的钢筋混凝土结构中，尽可能使用高强混凝土和高强钢材是有效利用材料的重要手段，在我国建筑业十二·五发展规划中也明确提出了相关的要求。预应力技术则是发挥高强钢材和高强混凝土作用最为有效的途径之一，在建筑业推广应用的十项新技术中，预应力技术一直是重点推广项目之一。

近 20 年以来，我国的预应力技术有了很大的发展，其应用的领域已远远超出传统预应力构件的范畴，预应力技术在不同类型的结构中，为了不同的目的而得到了广泛应用。对钢筋施加预应力以发挥高强预应力钢筋的强度、控制构件的开裂和变形已不是预应力技术应用的唯一目的，预应力作为主动控制结构行为的技术手段，同样也应用于钢结构、结构加固、结构变形控制以及结构连接中。

预应力结构的设计同样需要设计人员具有结构设计的基本概念，尤其是预应力作用的基本概念，只有在正确的预应力结构设计概念的基础上，才可能依据标准要求做好预应力结构的设计。

本书编写的目的，正是希望能够帮助设计人员理解预应力结构的特点，建立预应力作用的基本概念，并能够利用现有通用设计分析手段进行预应力结构设计。

在预应力结构的应用中，预应力框架结构无疑是设计人员接触最多、应用最广的结构形式，设计人员如果能够通过预应力框架结构的设计，建立正确的预应力结构设计概念，将有助于设计人员在更广泛的领域应用预应力技术。本书围绕预应力框架结构设计中设计人员关心的重点，从设计人员的实际需要出发，分析、解释在框架结构中预应力作用的概念，为设计人员依据现行混凝土结构设计规范进行预应力框架结构设计提供实用的设计方法，力图在标准确定的准则下，实现设计控制目标。本书的设计过程依据《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010编写，在本书中，为了便于设计人员对设计结果作出判断，给出了用不同分析方法进行设计的结果，读者可以根据设计工作的实际需要进行分析判断。

本书的作者虽然是在不同的时期进入四川省建筑科学研究院，但都是从参加工作开始即从事预应力结构相关的工作，在预应力结构设计、施工以及研究工作方面积累了相当的实际工作经验，也希望通过实际工作经验的总结，能够为预应力技术的推广应用作出微薄的贡献。作者在完成大量的日常工作的同时，为本书的编写付出了努力，全书是作者共同努力的结果，其中，张瀑负责第1、8章的编写，鲁兆红负责第2、3章及附录的编写，淡浩负责第4、5、6、7章的编写。编写过程中，四川省建筑科学研究院李辉、曹桓铭为本书的算例提供了基础性计算分析，中国建筑西南设计研究院毕琼提供了应用实例，在此一并表示感谢。

由于作者的理论水平有限，在本书中难免会有不恰当之处，请读者谅解并批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 预应力技术的基本概念 .....	2
1.2 近 20 年国内预应力技术发展概述 .....	9
1.2.1 预应力钢材 .....	9
1.2.2 预应力锚夹具 .....	10
1.2.3 预应力工艺 .....	10
1.2.4 预应力设计理论与技术标准 .....	11
1.2.5 预应力技术应用领域的不断扩展 .....	11
1.3 如何理解预应力的作用 .....	12
1.4 预应力技术的分类 .....	13
1.5 预应力技术应用实例 .....	14
1.5.1 60m 跨预应力组合式屋架 .....	14
1.5.2 36m 跨预应力框架 .....	15
1.5.3 有粘结预应力板 .....	16
1.5.4 索结构 .....	18
1.5.5 采用预应力技术进行托梁拔柱 .....	19
1.5.6 采用预应力技术对结构施工中的变形进行控制 .....	22
1.5.7 现浇预应力空心楼板结构 .....	22
1.5.8 体外预应力加固 .....	25
1.5.9 预应力钢结构 .....	25
1.5.10 高层无粘结预应力板 .....	27
1.5.11 无粘结预应力筒仓 .....	27
1.5.12 缓粘结预应力的应用 .....	29
1.5.13 预应力在超长结构中的应用 .....	31
<b>第 2 章 预应力材料</b> .....	32
2.1 预应力钢筋 .....	32

2.1.1	预应力钢筋的力学性能	32
2.1.2	预应力钢筋进场检验	32
2.2	混凝土	34
2.3	预应力孔道及灌浆材料	34
2.3.1	预应力孔道的基本性能要求	34
2.3.2	预应力孔道的检验要求	35
2.3.3	预应力孔道灌浆	38
2.4	预应力锚具	38
2.4.1	预应力锚具的选用	38
2.4.2	预应力锚具基本性能要求	38
2.4.3	预应力锚具现场检验要求	40
<b>第3章</b>	<b>预应力作用的分析</b>	<b>42</b>
3.1	概述	42
3.2	确定预应力构件的截面尺寸	43
3.3	预应力钢筋索形	43
3.3.1	预应力钢筋索形的基本参数	43
3.3.2	预应力钢筋索形的通用方程	46
3.4	预应力损失的计算	48
3.4.1	预应力损失的估算	49
3.4.2	张拉控制应力的确定	51
3.4.3	预应力钢筋摩擦损失 ( $\sigma_{l2}$ )	52
3.4.4	张拉端锚具变形和钢筋内缩损失 ( $\sigma_{l1}$ )	53
3.4.5	预应力钢筋松弛损失 ( $\sigma_{l4}$ )	56
3.4.6	混凝土的收缩和徐变损失 ( $\sigma_{l5}$ )	57
3.4.7	预应力总损失值	59
3.5	预应力钢筋数量的估算	60
3.6	预应力等效荷载	60
3.7	框架结构中预应力等效荷载分析	63
3.7.1	预应力等效荷载的计算	63
3.7.2	计算综合弯矩时等效均布荷载的简化	65
3.7.3	预应力等效荷载产生的剪力	68

3.8	预应力等效荷载对框架作用的分析 .....	68
3.9	预应力等效荷载对井字梁作用的分析 .....	71
<b>第4章</b>	<b>结构受弯承载力极限状态设计 .....</b>	<b>77</b>
4.1	预应力钢筋受力过程分析 .....	77
4.2	受弯承载力计算方法 .....	81
4.3	受弯承载力设计验算流程 .....	85
4.4	预应力框架结构抗震措施 .....	88
4.5	实例 .....	91
<b>第5章</b>	<b>结构正常使用极限状态设计 .....</b>	<b>97</b>
5.1	抗裂及裂缝宽度验算的一般规定 .....	97
5.2	一级、二级裂缝控制验算 .....	99
5.3	三级控制抗裂验算的实用方法 .....	100
5.3.1	影响裂缝宽度计算值的各项因素分析 .....	102
5.3.2	影响等效应力 $\sigma_{sk}$ 的各项因素分析 .....	109
5.3.3	以综合弯矩表达的 $\sigma_{sk}$ 的计算方法 .....	112
5.3.4	$\sigma_{sk}$ 的简化计算方法 .....	113
5.4	挠度验算 .....	123
5.4.1	GB 50010—2010 的规定 .....	123
5.4.2	简化估算方法 .....	125
<b>第6章</b>	<b>施工阶段验算 .....</b>	<b>128</b>
6.1	锚固区局部承压验算 .....	128
6.1.1	关于第一类裂缝 .....	128
6.1.2	关于第二类裂缝 .....	131
6.1.3	局部承压验算中需要注意的问题 .....	133
6.2	施工阶段预拉区的裂缝控制验算 .....	133
<b>第7章</b>	<b>预应力框架梁设计实例 .....</b>	<b>137</b>
7.1	工程概况 .....	137



7.2	预应力框架梁计算条件 .....	139
7.3	设计分析的主要结果 .....	139
7.4	预应力梁设计相关参数计算 .....	142
7.4.1	梁几何参数 .....	142
7.4.2	预应力钢筋索形 .....	142
7.4.3	预应力筋数量估算 .....	142
7.4.4	预应力损失计算 .....	143
7.4.5	预应力等效荷载、综合弯矩、次弯矩计算 .....	146
7.5	承载力校核 .....	149
7.5.1	支座处受弯承载力校核 .....	149
7.5.2	跨中处受弯承载力校核 .....	150
7.5.3	抗剪承载力校核 .....	152
7.6	抗震措施验算 .....	153
7.6.1	梁端截面非预应力钢筋的最小面积 .....	153
7.6.2	梁端截面受压区高度 .....	153
7.6.3	梁端截面折算后的配筋率 $\rho$ .....	153
7.6.4	梁端底部纵向钢筋的配筋量与顶部纵向钢筋的 配筋量的比值 .....	153
7.7	裂缝宽度验算 .....	153
7.7.1	跨中处裂缝宽度验算 .....	154
7.7.2	支座处裂缝宽度验算 .....	157
7.8	挠度验算（按照第5章所提出的简化方法计算） .....	161
7.9	局部受压 .....	162
7.10	施工阶段的应力验算 .....	162
7.10.1	支座处的应力验算 .....	162
7.10.2	跨中处的应力验算 .....	162
<b>第8章</b>	<b>常见问题</b> .....	<b>164</b>
8.1	常用术语 .....	164
8.2	结构方案选择 .....	170
8.3	预应力索形布置 .....	172
8.4	预应力损失计算 .....	174

8.5	预应力作用分析 .....	176
8.6	极限承载能力计算 .....	177
8.7	正常使用极限状态 .....	180
8.8	施工阶段验算 .....	182
8.9	施工工艺要求 .....	183
8.10	施工阶段 .....	184
<b>附录 A</b>	<b>锚固系统选用 .....</b>	<b>187</b>
<b>附录 B</b>	<b>预应力钢绞线基本性能 .....</b>	<b>189</b>
<b>附录 C</b>	<b>预应力钢丝基本性能 .....</b>	<b>190</b>
<b>附录 D</b>	<b>预应力螺纹钢筋基本性能 .....</b>	<b>191</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>192</b>

# 第 1 章 绪 论

预应力技术从 20 世纪 20 年代进入土木工程的实际应用以来，已经成为土木工程领域最重要的技术之一，尤其是在桥梁结构与大跨度房屋结构中，更是首选的技术。

预应力混凝土结构是由普通钢筋混凝土结构发展而来的，法国工程师弗来西奈在 1928 年研制成功了预应力混凝土，指出预应力混凝土必须采用高强钢材和高强混凝土，为预应力混凝土结构的发展奠定了基础。在第二次世界大战结束后，为了适应大规模建设的需要，在国外预应力技术开始得到大量应用，在 20 世纪 60 年代，林同炎提出的用于预应力结构分析的荷载平衡法极大地促进了预应力技术的普及。我国预应力技术的起步始于 20 世纪 50 年代初，在新中国成立后，需要大量建设工业厂房和民用建筑，但由于国内钢材奇缺，迫切需要研究利用高强度的钢材来满足经济建设的需要，由此开始了我国预应力技术的研究与应用。受限于条件，当时我国预应力技术发展走的是低强钢材预应力的道路，预应力钢材主要采用冷拉钢筋或冷拔钢丝，预应力技术主要应用于预制混凝土构件，典型构件有工业厂房中的预应力屋架、屋面梁、吊车梁等，还有民用建筑中的先张法预应力空心板等。

至 20 世纪 80 年代中期，我国预应力技术的应用，其主要目的仍然是通过对高强钢筋施加预应力使得高强钢筋能够充分发挥其作用，以减少钢材用量，同时克服混凝土抗拉强度低、容易开裂的缺点，应用的领域基本上以预制构件为主。

自 20 世纪 80 年代中后期开始，预应力技术得到广泛的应用。近 20 年来，建筑业推广应用的十项新技术中均列入了高效预应力技术，在建筑业“十二·五”推广应用的十项新技术中，

预应力技术仍是其重要的组成部分。在混凝土结构中，预应力技术由于采用了高强钢材和高强混凝土，可减少 30%~60% 的钢筋用量，且减少 20%~40% 的混凝土用量，并且由于预应力的作用，可以控制结构开裂、变形等不利影响，提高混凝土结构的耐久性。

近 20 年来，预应力技术已不仅被应用于混凝土构件，其应用的目的也不仅仅是为了发挥高强钢筋作用或提高混凝土的抗拉能力，预应力混凝土结构相比于传统的全预应力混凝土结构有了进一步的发展，逐渐应用于钢-混凝土组合结构、空间钢结构等领域，预应力技术的发展进入了新的历史时期。

## 1.1 预应力技术的基本概念

虽然预应力混凝土在 20 世纪 50 年代才进入实用阶段，但是，预应力的基本原理在古代就已经有许多方面的应用。铁箍木桶就是一个很好的例子，如图 1-1 所示，铁箍给松散的木桶楔块施加一定的压力，使其形成木桶并能够承受足够的侧向水压力，这就是早先的预应力原理。

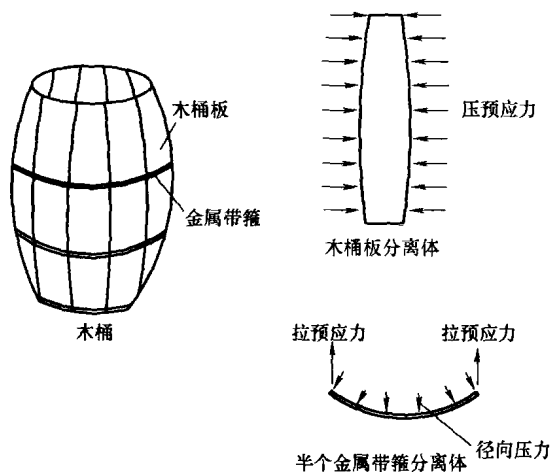


图 1-1 预应力原理图

## 1. 预应力混凝土结构的优点

预应力在混凝土构件中的应用主要是克服混凝土受拉强度低的弱点以及充分利用高强度钢材。对于钢筋混凝土受拉与受弯构件，由于混凝土的抗拉强度很低，一般其极限抗拉强度约为其抗压强度的  $1/10$ ，因此，在正常使用状态时，混凝土构件通常是带裂缝工作的；对于不允许开裂的构件，其受拉钢筋的应力仅达到  $20\sim 30\text{MPa}$ 。而对于允许开裂的构件，通常当受拉钢筋应力达到  $250\text{MPa}$  时，裂缝宽度已达到  $0.2\sim 0.3\text{mm}$ ，此时构件的耐久性已有所降低，同时也不宜用于高湿度或具有腐蚀性的工作环境。预应力的作用是在结构构件受荷载作用前，使构件产生预压应力来减少或抵消荷载所引起的混凝土拉应力，以控制结构构件的拉应力水平，甚至使构件处于受压状态，从而避免钢筋混凝土构件的裂缝过早出现，充分利用高强度钢筋及高强度混凝土，改善其使用性能和耐久性能。

预应力混凝土结构具有以下优点：

(1) 预应力混凝土由于有效利用了高强度的钢筋和混凝土，所以其可做成比普通钢筋混凝土跨度大而自重小的细长承重结构；

(2) 预应力可以改善混凝土结构的使用性能，从而可以防止混凝土开裂，或者至少可以把裂缝宽度限制到无害的程度，这就提高了结构的耐久性；

(3) 在使用荷载作用下即使是部分预加应力，也可将结构的变形控制在很小的状态；

(4) 预应力混凝土结构具有很高的抗疲劳性能，即使采用部分预应力技术，钢筋应力的变化幅度也较小；

(5) 预应力混凝土构件中，只要钢筋应变在  $0.01\%$  以下，超载引起的裂缝在卸除荷载后就可能重新闭合。

## 2. 预应力混凝土梁的工作原理

预应力混凝土梁的工作原理可由图 1-2 予以说明。

如图 1-2 所示的预应力混凝土简支梁，在荷载作用之前，预

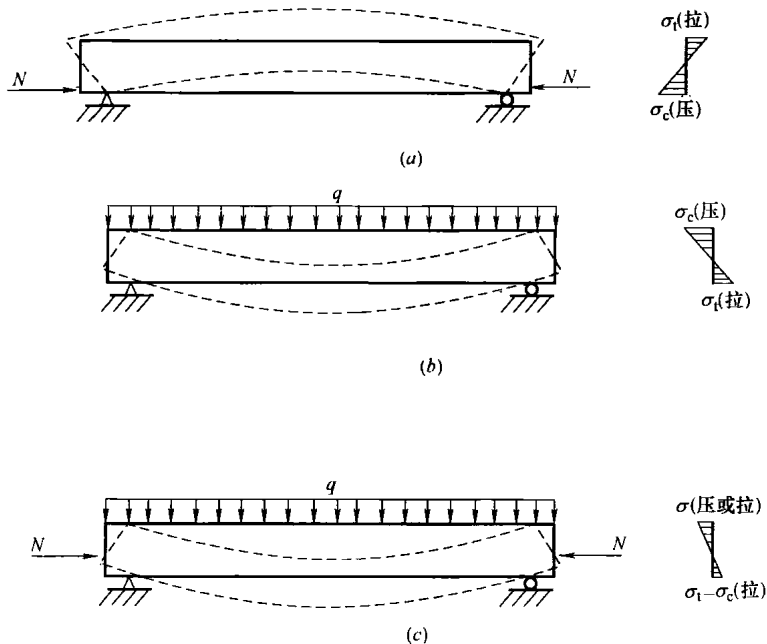


图 1-2 预应力混凝土简支梁

(a) 预应力作用下；(b) 外荷载作用下；(c) 预应力与外荷载共同作用下

先在梁的受拉区施加的偏心压力  $N$ ，使梁下边缘混凝土产生预压应力为  $\sigma_c$ ，梁上边缘产生不大的预拉应力  $\sigma_t$ ，如图 1-2 (a) 所示。当荷载  $q$ （包括梁自重）作用时，梁跨中截面下边缘产生拉应力，梁上边缘产生压应力  $\sigma_c$ ，如图 1-2 (b) 所示。这样，在预压力  $N$  和荷载  $q$  共同作用下，梁的下边缘拉应力将减至  $\sigma_t - \sigma_c$ ，梁上边缘应力一般为压应力，但也有可能为较小的拉应力，如图 1-2 (c) 所示。如果施加的预加力  $N$  比较大，则在荷载作用下梁的下边缘就不会出现拉应力。由此可见，预应力混凝土构件可延缓混凝土构件的开裂，提高构件的抗裂度和刚度，同时可节约钢筋，减轻构件自重，克服钢筋混凝土的缺点。

### 3. 林同炎提出的预应力混凝土的概念

林同炎教授对预应力混凝土的原理总结了三种不同的、较为

精辟的概念。

(1) 预加力使混凝土具有弹性材料的性能

预加力使混凝土具有弹性材料的性能是指混凝土构件通过施加预加力后，构件的混凝土性能从原先抗拉弱抗压强的脆性材料演变为一种既能抗拉又能抗压的弹性材料。此时，混凝土同时承受内部预应力和外部荷载的作用。外部荷载引起的拉应力被预应力所产生的预压应力所抵消。在全预应力混凝土结构的情形中，正常使用状态下混凝土没有裂缝出现，甚至没有拉应力出现，在两个力系作用下所产生的混凝土的应力、应变及挠度均可按弹性材料的计算公式考虑，并在需要时叠加。

(2) 对混凝土构件施加预应力是为了使高强钢材与混凝土能协同工作

预应力混凝土构件可看做是高强钢材与混凝土两种材料的一种结合，它也与钢筋混凝土一样，用钢筋承受拉力，用混凝土承受压力，以形成一抵抗外力弯矩的力偶，如图 1-3 所示。

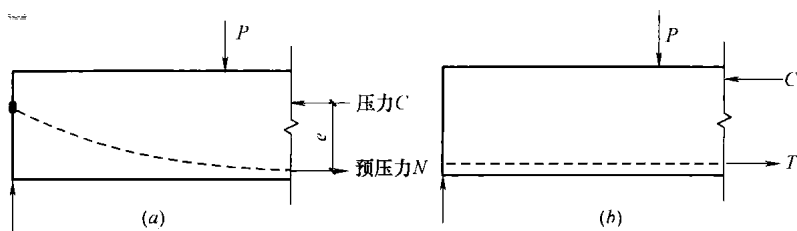


图 1-3 预应力混凝土梁与钢筋混凝土梁的内部抵抗力矩

(a) 预应力梁；(b) 钢筋混凝土梁

在混凝土结构中采用高强钢筋时，如果要使高强钢筋的强度充分被利用，必须使其有很大的伸长变形，但是，如果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，那么，在外荷载作用下高强钢筋周围的混凝土势必严重开裂，构件将出现不能容许的裂缝和挠度。因此，混凝土构件中的高强钢筋必须与混凝土结合之前预先张拉，从这一观点看，预加应力只是一种充分利用高强钢材的有效手段，所以预应力混凝土可看成

是钢筋混凝土应用的扩展，这一概念清晰地表明预应力混凝土也没有超越材料本身强度的能力。

### (3) 施加预应力以实现部分荷载平衡

施加预应力以实现部分荷载平衡是指将施加预应力看做是试图平衡构件中的部分或全部的外荷载。如果外荷载对梁各截面产生的力矩均被预加力所产生的力矩抵消，那么，一个受弯的构件就可以转换成一轴心受压的构件。如图 1-4 所示，抛物线形配筋的预应力简支梁，在预加力  $N$  作用下，梁体可以看成承受向上的均匀荷载  $q$  以及轴向力  $N$ 。如果抛物线形配筋的预应力梁上作用的也是荷载集度为  $q$ 、方向向下的均布荷载，那么，两种效应抵消后，梁在工作荷载下仅受轴力  $N$  的作用，即梁不发生挠曲也不产生反拱。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增加的应力，这种把预加力看成实现荷载平衡的概念是由林同炎教授提出的。这种方法大大简化了复杂难解的预应力混凝土结构的设计与分析，尤其适用于超静定预应力混凝土梁。

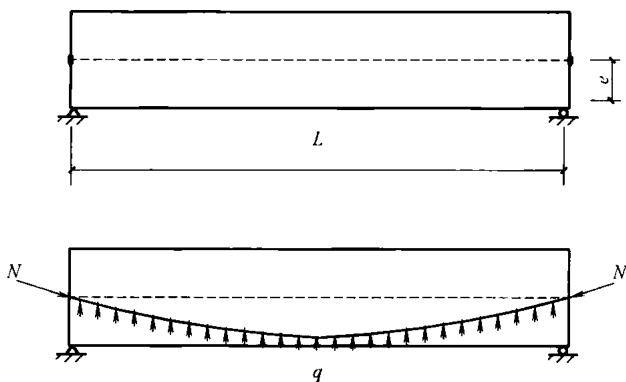


图 1-4 抛物线形配筋的预应力简支梁

对于预应力混凝土可以从以上三个不同的方面认识，从不同的角度来解释预应力混凝土的原理。预加力使混凝土具有弹性材料的性能可看成是全预应力混凝土弹性分析的依据；对混凝土构



件施加预应力是为了使高强钢材与混凝土能协同工作则可看成是强度理论，它指出预应力混凝土不能超越其材料自身强度的界限；施加预应力是实现部分荷载平衡则为复杂的预应力混凝土超静定梁的设计与分析提供了简捷的方法。

#### 4. 预应力度的概念

国内外针对预应力混凝土构件，分别按照其施加预应力的程度或预应力钢筋的含量与非预应力钢筋的含量之比，提出了区别预应力混凝土构件分类的指标，即预应力度的概念。

按照两种不同概念给出的预应力度，其描述的含义有所不同。按照施加预应力程度所给出的预应力度表示在正常使用极限状态下，对构件所施加的预应力大小，预应力度越大则构件受拉侧的拉应力越小；按照钢筋强度比所给出的预应力度则表示在承载能力极限状态下预应力筋和非预应力钢筋分别承担的拉力比，预应力度越大则预应力钢筋承担的外荷载越大。

##### (1) 用施加预应力的程度表达的预应力度

对于受弯构件，用施加预应力的程度表达的预应力度定义为消压弯矩与全部使用荷载弯矩的比值，公式表达为：

$$\lambda_p = \frac{M_d}{M_g + M_q} \quad (1-1)$$

式中  $M_d$ ——消压弯矩，即构件控制截面预压受拉边缘应力抵消到零时的弯矩；

$M_g$ ——恒载作用下控制截面的弯矩；

$M_q$ ——活载作用下控制截面的弯矩。

$\lambda_p = 1$  时，构件在外荷载的作用下，截面不会出现拉应力，混凝土具有弹性材料的性能，此时的构件为全预应力混凝土构件。

$\lambda_p = 0$  时，构件消压弯矩为零，即构件为普通钢筋混凝土构件。

$0 < \lambda_p < 1$  时，构件的性能介于全预应力混凝土构件和普通混凝土构件之间，即通常所称的部分预应力混凝土构件，其受力