土木建筑工程继续教育丛书

部分预应力混凝土

杜拱辰　编著

中国建筑工业出版社

土木建筑工程继续教育丛书

部分预应力混凝土

杜拱辰　编著

中国建筑工业出版社

部分预应力混凝土由于采用了预应力与非预应力混合配筋，基本上兼有全预应力与普通钢筋混凝土两者的优越性能，是当代加筋混凝土发展的主流。本书是根据国内外实践经验与最新科研成果编写而成。

本书内容主要包括部分预应力混凝土的基本原理、性能、材料和工艺，以及结构设计计算方法与简化设计方法，也包括等效荷载与荷载平衡、无粘结筋的强度计算和无粘结预应力混凝土的应用等最新成果。

本书可供具有大专文化程度的土建工程技术人员及高等院校有关专业师生学习参考，亦可作为进修自学教材，或短期培训使用。

土木建筑工程继续教育丛书
部分预应力混凝土
杜拱辰 编著
*
中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）
新华书店经销
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：5⅜ 字数：144 千字
1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷
印数：1—3,910册 定价：4.70元
ISBN7—112—01097—7/TU·798
（6169）

出 版 说 明

社会的进步、经济的振兴和科技的发展，都依赖于劳动者素质的提高和大量合格人才的培养。为此，必须努力通过各种途径，加强对劳动者的职业教育和在职继续教育。

为满足土木建筑界科技工作者补充新知识的需要，在中国建筑学会及中国土木工程学会的倡导和参与下，我社拟编辑一套《土木建筑工程继续教育丛书》，由两个学会各专业委员会协助，按专题约请有关专家执笔，陆续出版。

本丛书以在职的具有大专文化程度的中青年科技工作者为主要对象，可作为进修自学材料，也可供短期培训之用。

中国建筑工业出版社

序　言

部分预应力混凝土是一种新型的加筋混凝土。由于采用了新的设计理论以及预应力与非预应力混合配筋，部分预应力混凝土结构兼有“全”预应力混凝土与普通钢筋混凝土两种结构的优越性能。它既能更有效地控制使用条件下的应力、裂缝与变形，破坏前又具有较高的延性和能量吸收能力，因此很有发展前途。目前，部分预应力混凝土的合理性与经济性，已为世界各国工程界所普遍接受，并认为这种介于“全”预应力混凝土与钢筋混凝土两种极端状态之间的部分预应力混凝土，即将成为加筋混凝土系列中的主流。

我国于50年代就开始采用容许开裂的预应力混凝土，但这种结构用的预应力筋仅限于强度较低的Ⅱ、Ⅲ级粗钢筋，并不适用于高强钢材。随着部分预应力设计思想的传播和国产预应力高强钢丝和钢绞线产量的增加，摆在我国土建工作者面前的迫切任务是如何掌握现代预应力混凝土的新理论、新材料、新工艺来生产高效预应力混凝土，以建造各种现代化的工程结构来满足“四化”建设的需要。

本书比较系统地介绍部分预应力混凝土的性能、原理等基本知识。既包括预应力混凝土设计思想的发展，预应力的分类，开裂截面的性能（应力、裂缝和挠度的计算和控制），无粘结部分预应力混凝土的性能和强度等有关的专门问题。也包括安全度、等效荷载与荷载平衡、新材料、新工艺等近年来国内外的一些新成就，并对部分预应力受弯构件提出一套简化的设计方法。

本书虽因不涉及具体规范的有关规定和数据而不能直接用以进行设计，但对读者进一步理解国内外设计、施工规范条文，规

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

第一章　绪论 …… 1
1.1　预应力混凝土设计思想的发展 …… 1
1.2　加筋混凝土的分类 …… 3
1.2.1　CEB/FIP的分类 …… 3
1.2.2　《TJ10—74》规范分类 …… 5
1.2.3　《部分预应力混凝土结构设计建议》的分类 …… 6
1.3　全预应力与部分预应力的比较 …… 8
1.3.1　实现部分预应力的方法 …… 8
1.3.2　优缺点的比较 …… 8
1.4　非预应力筋的作用 …… 10
1.4.1　非预应力筋的各种用途 …… 10
1.4.2　普通钢筋在工作荷载下的应力 …… 13
1.4.3　普通钢筋在极限荷载下的应力 …… 15
第二章　预应力混凝土设计与安全度 …… 19
2.1　各种设计方法简介 …… 19
2.2　极限状态 …… 20
2.3　概率极限状态设计法 …… 21
2.4　国外规范取用的系数值 …… 24
第三章　部分预应力混凝土截面分析及设计原则 …… 30
3.1　截面的弹性应力分析 …… 30
3.2　裂缝截面的应力分析 …… 32
3.3　裂缝宽度计算方法 …… 34
3.3.1　我国《混凝土结构设计规范》的裂缝计算公式 …… 35
3.3.2　用名义拉应力控制裂缝的方法 …… 37
3.3.3　裂缝宽度的限制 …… 41
3.4　挠度的计算 …… 42

3.5 预应力混凝土的抗震性能 ……45
3.5.1 预应力混凝土的弯矩—曲率滞回曲线 ……45
3.5.2 预应力混凝土截面延性的定义和影响因素 ……47
3.5.3 无粘结预应力板-柱节点的抗侧力性能 ……53
第四章 荷载平衡设计法 ……57
4.1 等效荷载 ……57
4.2 荷载平衡法 ……60
4.3 平衡荷载的选择 ……69
4.4 荷载平衡法在超静定结构中的应用 ……71
4.4.1 刚架 ……71
4.4.2 双向板的荷载平衡 ……73
4.4.3 壳体的荷载平衡 ……76
第五章 无粘结预应力梁板的性能……79
5.1 无粘结预应力混凝土梁、板的特性 ……79
5.2 无粘结部分预应力混凝土的特性 ……81
5.3 部分预应力梁板中无粘结筋极限应力的理论计算 ……89
5.4 无粘结预应力筋在楼板中的应用 ……93
5.5 无粘结束的可靠性 ……101
5.5.1 耐久性 ……101
5.5.2 抗震性能 ……103
第六章 材料和工艺 ……105
6.1 钢材 ……105
6.1.1 普通钢筋 ……105
6.1.2 预应力高强钢材 ……106
6.1.3 对预应力钢材性能的要求 ……109
6.2 流态混凝土 ……113
6.3 无粘结筋的制作及质量要求 ……115
6.4 后张束张锚体系 ……119
6.4.1 单根钢绞线张锚体系 ……120
6.4.2 单根钢绞线群锚体系 ……124
6.4.3 对无粘结束的保护 ……125
第七章 部分预应力混凝土受弯构件设计……130
7.1 跨-高比的选择 ……130

7.2 混凝土截面形状的选择 ……132
7.3 简支梁的纵向布置 ……134
7.3.1 先张法预应力混凝土梁 ……135
7.3.2 后张法预应力混凝土梁 ……137
7.4 预应力损失值 ……138
7.4.1 预应力损失计算一般情况 ……138
7.4.2 损失计算的时间阶段法 ……139
7.4.3 总损失近似估计值 ……139
7.5 部分预应力梁设计步骤 ……142
7.6 部分预应力梁的简化设计 ……145
参考文献 ……158

第一章　绪　论

1.1　预应力混凝土设计思想的发展

预应力的基本原理，预先人为地造成内应力以抵抗使用过程中产生的应力，是一种古老的技术。在日常生活中，稍加注意，是不难发现应用实例的。木桶是一个众所周知的简单例子，靠套紧竹箍产生的压应力使木板拼实以防止接缝漏水。中国式木锯是另一个较为复杂的预应力结构的例子，靠绞紧绳子使锯片产生预拉应力以抵消锯木时出现的压应力，从而防止锯片的压曲失稳。自行车轮子的钢圈与幅条、装卸红砖用的砖夹子也都是例子。可见预应力的原理应用广泛，既可用预压应力以抵抗预期的拉应力，也可用预拉应力以抵抗预期的压应力。

早在十九世纪80年代，即已开始用张拉钢筋以改善钢筋混凝土梁裂缝性能的研究，但这些早期的尝试都由于预压应力损失过大而未能获得成功。直到1928年在著名的法国工程师弗来西奈（Freyssinet）认识到混凝土收缩、徐变对预应力损失值的影响以及采用高强钢材和高强混凝土的必要性，从而得以在混凝土中建立足够的有效预压应力（即永存预压应力）之后，预应力在混凝土中的应用方成为现实。

按照弗氏的见解，预加应力的目的是为了改变混凝土的性质，从脆性材料转化为匀质的弹性材料，用混凝土预先承受的压应力来抵消预期承受的拉应力。混凝土既然不承受拉应力，当然也就不会出现裂缝。因此“无拉应力”或“零应力”就成为预应力结构设计的基本准则。这种在一切荷载组合下混凝土均不得承受拉应力（或弯拉应力）的预应力混凝土，后来被称作“全”预应力混

凝土。所谓“全”是指在工作荷载下必须保持“全”截面均处于受压状态而不出现拉应力。弗氏认为预应力筋是使混凝土造成压应力的一种手段，而不是配筋。因此，“全”预应力混凝土与处在裂缝条件下工作的钢筋混凝土是“截然不同的两种结构材料”，并认为任何处于两者中间状态的东西都比两者差，是没有价值的。

奥地利的恩丕格（V.Emperger）于1938年从普通钢筋混凝土出发，提出附加少量预应力筋以改善裂缝和减小挠度的观点。1940年，阿贝勒斯（P.W.Abeles）从“全”预应力混凝土出发进一步提出在使用荷载作用下容许混凝土承受拉应力甚至出现微细裂缝的更为具体的“部分”预应力概念。但由于和弗氏学派的见解相反，当时都没有受到国际上的重视，基本上处于被否定或微不足道的地位。尽管如此，“部分”预应力的观点还是以其它的形式在一些国家推开了。例如苏联和我国于50年代采用抗裂安全系数法设计的严格要求或一般要求不开裂的预应力混凝土（用高强钢丝作预应力筋）结构就基本上是“部分”预应力的，按60年代林同炎教授提出的荷载平衡法设计的结构很多也是部分预应力的。

随着“全”预应力混凝土结构的大量实践，逐步暴露出由于预加应力过大而引起的一些缺陷，迫使人们更多地去探求使用性能更好的结构。在1962年由国际预应力混凝土协会（FIP）和欧洲混凝土委员会（CEB）联合召开的会议上，对降低预应力混凝土抗裂性要求进行了讨论，并提出了把“全”预应力、“部分”预应力和普通钢筋混凝土连贯起来的设计思想。在1970年于布拉格召开的第六届国际预应力混凝土会议上，接受了CEB和FIP联合提出的按预应力程度大小将加筋混凝土分为四类的建议。从此部分预应力开始在国际上受到重视。后来又经过1974年和1978年两届FIP大会以及1980年FIP在罗马尼亚首都布加勒斯特召开的部分预应力混凝土学术会议，部分预应力混凝土的科学性与经济性才被各国工程界所普遍接受，并认为这种介于全

预应力混凝土与钢筋混凝土两个极端状态之间的部分预应力混凝土即将成为加筋混凝土系列的主流（图1-1）。

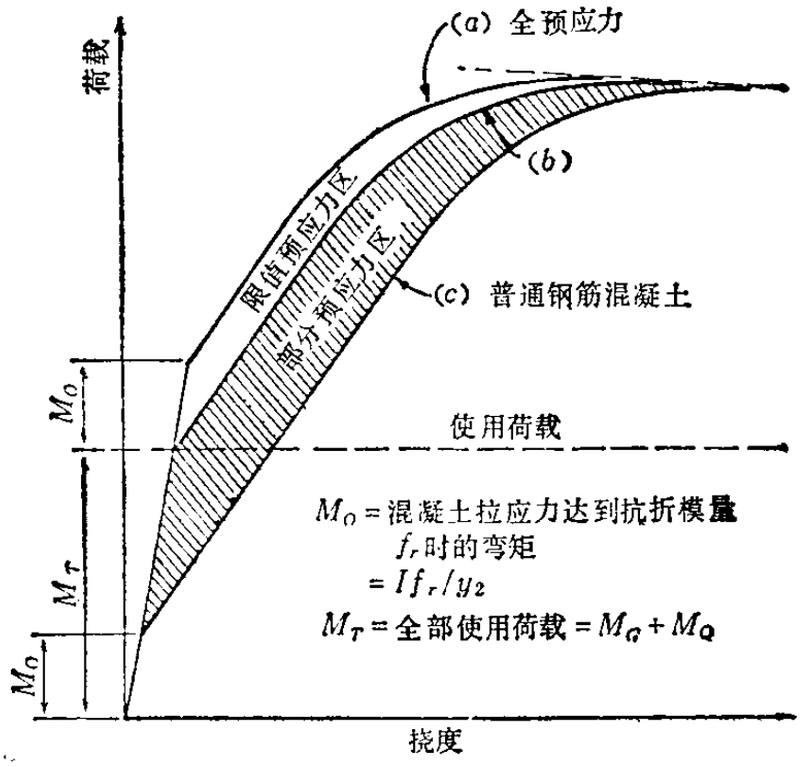

图 1-1 不同预应力度(同样配筋率)有粘结适筋梁的弯矩-挠度曲线

(a)在M_T作用下最大弯矩截面底纤维拉应力＝0的“全”预应力梁的曲线；(b)在M_T在作用下最大弯矩截面底纤维拉应力正好等于抗折模量的限值预应力梁的曲线；(c)系钢筋混凝土梁的弯矩-挠度曲线。

1.2 加筋混凝土的分类

1.2.1 CEB/FIP的分类

在1970年于布拉格召开的第六届国际预应力混凝土会议上，CEB/FIP联合提出把加筋混凝土按预加应力的程度分成四个级别的建议[1]。

1级：全预应力混凝土(Fully prestressed concrete)—在传力过程或全部使用荷载下都不容许混凝土出现拉应力。

2级：限值预应力混凝土（Limited prestressed concrete）—在传力时或使用荷载下，混凝土截面中容许出现拉应力，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

但不得开裂。尽管理论上拉应力可以达到弯曲抗拉强度，但考虑到收缩对混凝土引起的拉力，这个拉应力限定不得超过0.80倍弯拉强度。此外，还常要求在恒载及活荷载的长期作用部分（即准永久性部分）共同作用下受拉区边缘混凝土不得消压，亦即不得出现拉应力。这一要求保证了混凝土很少有机会承受拉力。

3级：部分预应力混凝土(Partially prestressed concrete)—根据结构的种类和暴露的条件，在使用荷载下容许出现不超过0.1mm或0.2mm宽度的裂缝。例如，对暴露于腐蚀性大气条件下的结构，裂缝宽度以不超过0.1mm为好；对处于普通环境并有保护的结构，在工作荷载下的裂缝宽度可以到0.2mm。

4级：不施加预应力的普通钢筋混凝土。

联合建议用以分级的主要标准是预应力度的高低，各级之间的差异主要是混凝土的拉应力和裂缝。这里的拉应力指的是沿梁轴向的弯拉应力或拉杆的拉应力而不是其他原因引起的拉应力或主拉应力。至于什么叫部分预应力？由于各国的习惯不同，仍有广义与狭义两种意见，前者认为Ⅱ级与Ⅲ级都是部分预应力，后者只承认Ⅲ级为部分预应力。本书以下各章所称的部分预应力混凝土都是指广义的，亦即包括限值预应力在内。

上述分类法由于对部分预应力的优越性强调不够，容易造成错觉，似乎Ⅰ级比Ⅱ级好，Ⅱ级比Ⅲ级好，引起盲目要求采用Ⅰ级的后果。于是又产生摒弃上述分类的意见[2]，认为结构质量的高低，取决于它的使用性能，强度和耐久性，诸如结构的反拱、挠度、裂缝、延性，安全度等，而不决定于预应力度的大小。因此应改用根据结构功能的要求合理选用预应力度的方法。

在1982年制订的《FIP实用设计建议》(草案)中[3]，既照顾到克服盲目选用全预应力的倾向，又考虑到设计上的方便，预应力度按任何荷载组合下的应力状态定义为：

（1）“全”预应力：沿预应力筋方向没有达到消压极限状态；

（2）限值预应力：拉应力没有达到混凝土抗拉强度设计值；

（3）部分预应力：混凝土拉应力没有限制。

上述定义把预应力度和全部使用荷载脱钩而成为一个随荷载条件而改变的相对概念。例如按全部使用荷载（荷载最不利组合）设计成开裂的部分预应力的结构，在长期荷载组合下可能变为“全”预应力或限值预应力截面的结构。

显然，这种定义并无用预应力度来划分结构优劣等级的意图，而只是作为控制结构设计采用的一种指标而已。

1.2.2 《TJ10—74》规范分类

我国TJ10—74钢筋混凝土结构设计规范[4]对预应力混凝土结构的设计按抗裂度的要求分为严格要求不出现裂缝，一般要求不出现裂缝和允许出现裂缝三类。这一分类和1970年CEB/FIP规范草案提出的分级精神大体上是类似的，但对如何保证能达到所要求的抗裂度的计算方法则有很大差别[5]。验算正截面抗裂安全系数的表达式是：

$$K_f \leqslant \frac{\sigma_c + \gamma R_f}{\sigma}$$

式中 K_f——抗弯安全系数；

σ——使用荷载下截面受拉边缘产生的拉应力；

σ_c——截面受拉边缘混凝土的预压应力；

γ——截面抵抗矩的塑性系数；

R_f——混凝土的抗裂设计强度；

对严格要求不出现裂缝的结构，顾名思义，应该是全预应力的，但采用$K_f=1.25$进行控制，很难满足全预应力的要求。如将不得出现拉应力的条件，亦即$\sigma-\sigma_c \leqslant 0$代入上式，可得到能满足全预应力的条件为：

$$\sigma_c \geqslant \gamma R_f/(K_f-1)$$

如采用400号混凝土，轴心抗裂强度为25.5kgf/cm²，受弯构件抗裂强度（矩形截面）为$\gamma R_f=1.75\times25.5=44.6$kgf/cm²。将$\gamma R_f$数值代入上式，即可求得取用抗裂安全系数1.25时满足全预应力条件时的预压应力最低值为：

受弯构件　　$\sigma_c = 178.4 kgf/cm^2$

轴拉构件　　$\sigma_c = 102 kgf/cm^2$

当取用抗裂安全系数$K_f = 1.15$时，预压应力最低值将分别为297和170kgf/cm²。由于400号混凝土除去损失后的预压应力值一般不会超过$0.4R$，亦即$0.4 \times 400 = 160 kgf/cm^2$，因此除轴心受拉$K_f > 1.25$者外全都出现拉应力，亦即均为限值或部分预应力混凝土。

此外，当使用荷载产生的应力较小时，尽管K_f满足要求，两类结构都会出现主要依靠混凝土抗拉，甚至不加预应力仍能满足抗裂要求的现象。由于混凝土抗拉强度的不稳定性，这种用包括混凝土抗拉强度在内的抗裂安全系数控制法，不仅分类界限不清，也不能反映结构的真实抗裂能力。针对这个问题，正在修订中的《混凝土结构设计规范》送审稿[6]中对严格要求不出现裂缝和一般要求不出裂缝的结构已改用预压应力或混凝土拉应力控制的方法。

1.2.3　《部分预应力混凝土结构设计建议》[7]的分类

《设计建议》对预应力度的定义为：

1.受弯构件

$$\lambda = M_0/M$$

式中　M_0——消压弯矩，亦即使构件控制截面受拉边缘应力抵消到零时的弯矩，其值为：

$$M_0 = \sigma_c W_0$$

式中　σ_c——受弯构件在预应力作用下受拉边缘的有效预压应力；

W_0——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；

M——使用荷载短期组合作用下对控制截面产生的弯矩。

2.轴拉构件

$$\lambda = \frac{N_0}{N}$$

式中　N——使用荷载短期组合作用下的轴向拉力；

N_0——消压轴向力，即使构件截面应力抵消到零时的轴向力，其值按下式计算：

$$N_0 = \sigma_c A_0$$

其中 σ_c——轴心受拉构件在预加力作用下产生的有效压应力；

A_0——构件的换算截面。

预应力度λ的范围可从全预应力混凝土变化到钢筋混凝土

全预应力混凝土 $\lambda \geqslant 1$

部分预应力混凝土 $1 > \lambda > 0$

钢筋混凝土 $\lambda = 0$

按照使用荷载短期组合作用下构件正截面混凝土的应力状态，部分预应力构件可分为两类：

*A*类 正截面混凝土拉应力不超过表1.1规定的限值；

*B*类 正截面混凝土虽已超过表1.1规定限值，但裂缝宽度不超过规定值（表1-2）。

A类构件混凝土拉应力限值表 表 1-1

构件类型	受弯构件	轴心受拉构件
拉应力限制	$0.8f_t^b$	$0.5f_t^b$

房屋结构裂缝宽度限值表 表 1-2

环境条件	荷载组合	钢丝、钢绞线、Ⅴ级钢筋	冷拉Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级钢筋
轻度	短期	0.15	0.3
	长期	0.05	（不验算）
中等	短期	0.1	0.2
	长期	（不得消压）	（不验算）
严重	短期	（不得采用B类构件）	0.10
	长期	（不得消压）	（不验算）

1.3 全预应力与部分预应力的比较[8][9]

1.3.1 实现部分预应力的方法

这里所指的部分预应力是广义的，亦即包括CEB/FIP分类中的限值预应力在内。为实现部分预应力的方法有很多种，对采用高强钢丝与钢绞线配筋的结构，主要有以下三种方法：

（1）降低预应力筋的张拉控制应力以降低预加力。但此法对预应力筋张拉劳力的费用和锚具费用并无减少，不经济，很少采用。

（2）全部采用高强钢材，但只张拉其中的一部分。和前一种方法相比可以减少一部分锚具和张拉的费用，但实际上也很少用。

（3）采用高强度预应力筋与非预应力普通钢筋（Ⅱ、Ⅲ级变形钢筋）混合配筋。由于非预应力筋有利于控制裂缝和挠度的发展，结构性能好，同时也具有减少锚具和张拉费用之利，因之用得最多，是当前部分预应力普遍应用的方法。

当采用中低强钢筋（Ⅱ—Ⅳ级冷拉钢筋）作预应力筋时，由于预应力损失百分率大，即使按最大容许张拉应力控制，这种结构也都是部分预应力的。

1.3.2 优缺点的比较

全预应力结构的主要优点：

（1）抗裂度高，适用于要求防止混凝土开裂的工程，如处于严重腐蚀环境，需要防止钢筋锈蚀的结构以及需要防止渗漏的压力容器等结构。

（2）全预应力的分析比较简单，由预加力和荷载引起的应力和挠度的计算都可以用弹性理论以及毛截面的面积和惯性矩。由于开裂截面的分析比不开裂的截面要复杂得多，因此部分预应力结构的设计比全预应力烦琐冗长。

（3）在反复荷载作用下，全预应力截面中预应力筋的应力

变化幅度较小，因此疲劳不成问题，亦即“不裂不疲“；但在开裂截面中的应力变化幅度大，部分预应力截面可能发生疲劳。

（4）由于不开裂截面的刚度比开裂的截面大，全预应力结构在活载下的挠度较小。

部分预应力结构的优点主要有：

（1）全预应力结构，特别是在恒载小活荷载大的条件下会发生长期反拱的问题。这是由于预压区混凝土长期处于高压应力状态引起的徐变，使反拱不断增长的缘故。部分预应力结构由于预加力较小，不存在长期反拱问题。

（2）部分预应力结构由于配置有普通钢筋，改善了关键截面在非线性阶段工作的延性和能量吸收能力，对结构抗震有利。

（3）全预应力设计常由使用荷载下不出现拉应力的条件控制，抗弯强度安全系数往往偏大，浪费钢材。部分预应力有利于节约预应力筋。

（4）在恒载小、活荷载大的情况下，全预应力设计要求截面有较大的预压区面积（如I形或⊥形），以储存抵抗活载需要的预压应力或提高混凝土强度等级。部分预应力则可采用更为有效的截面形状（如T形）或较低的混凝土等级。

（5）当构件支座不能自由滑动时，全预应力构件的纵向缩短（收缩与徐变），由于受相邻构件的约束而引起的拉应力能造成严重的裂缝。例如，在先张法构件端部传力长度范围内就会出现这种严重裂缝。后张法构件当预压应力过大时会发生沿预应力筋方向的水平裂缝。解决的有效方法是改用部分预应力以降低预压应力。

（6）全部使用荷载出现的机遇是很少的，经常作用的只是全部恒载和一部分活荷载。根据西德 Leonhardt 对一些不同用途结构承受的活荷载的调查研究，经常或长期作用的活荷载只有全部设计活荷载的20～70%。因此部分预应力构件在极大部分使用时间内混凝土并不承受全部使用弯矩引起的拉应力。当全部活荷载偶然出现时，构件将出现裂缝，但这些裂缝将随活荷载的移去

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com