

土木工程专业研究生系列教材

预应力结构理论

(第二版)

房贞政 编著

Master of Civil Engineering



中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

土木工程专业研究生系列教材

预应力结构理论

(第二版)

房贞政 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

预应力结构理论/房贞政编著. —2版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 6

土木工程专业研究生系列教材

ISBN 978-7-112-16641-1

I. ①预… II. ①房… III. ①预应力结构-研究生-教材 IV. ①TU378

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 059043 号

本书讲述预应力结构的理论及其工程应用。书中的内容着重于部分预应力混凝土结构、无粘结预应力混凝土结构、预应力混凝土超静定结构、预应力混凝土结构的抗震理论和试验研究,同时还介绍了预应力钢-混凝土组合结构、预应力钢结构以及 FRP 力筋预应力混凝土结构等新型结构。本书的编著力求理论与工程实践相结合。

本书可作为土木工程专业高年级本科生、研究生学习预应力结构的教材,亦可供土木工程领域的技术人员和高等院校的教师参考。

* * *

责任编辑: 朱首明 吉万旺

责任设计: 李志立

责任校对: 张颖 关健

土木工程专业研究生系列教材

预应力结构理论

(第二版)

房贞政 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22½ 字数: 550 千字

2014 年 7 月第二版 2014 年 7 月第四次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-16641-1

(25452)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

第二版前言

《预应力结构理论与应用》自 2005 年出版以来，得到广大研究生、本科生以及工程技术人员采用，也获得了读者们的宝贵意见。从第一版发行至今，预应力技术又有了新的发展，尤其是在新型预应力结构和预应力混凝土结构的抗震性能等方面，同时我国也颁布了新的规范。本书根据我国现行的新规范对《预应力结构理论与应用》进行了修订，并根据预应力技术新的发展，在第 3 章增加了预应力损失研究方法；在第 7 章增加了预应力混凝土结构的有限元分析方法；在第 8 章增加了混凝土结构抗震设计的一般规定和预应力结构的振动台试验等内容；在第 9 章增加了预应力混凝土波纹钢腹板结构等。本书第二版的修编，程浩德、张超、陈永健、黄颖等博士参与了部分章节的修改，在此一并致谢。

根据本书的使用范围，第二版增强了理论性与系统性，同时书名为《预应力结构理论》。衷心感谢使用本书的师生和工程技术人员，并诚恳地希望读者能继续提出宝贵的意见，以使本书更加日臻完善。

房贞政

2013 年 12 月 于福州大学

第一版前言

预应力技术从 20 世纪 20 年代进入土木工程领域的实际应用至今，已经走过了 80 多年的历程。在预应力技术发展的初期，普通的粘结预应力混凝土是主要的结构形式，全预应力混凝土的设计观念也是工程师们所普遍采用的。随着预应力技术与材料的发展，尤其在 20 世纪 70 年代后，随着无粘结预应力技术的成熟，以及部分预应力概念为工程师们所接受之后，预应力混凝土结构的应用得到了一次飞跃的发展。至 20 世纪末，预应力技术又在钢-混凝土组合结构、钢结构，尤其是空间钢结构得到广泛的应用，不仅拓宽了预应力技术应用的领域，还涌现出了日新月异的新结构体系。预应力结构发展更为完善的则是纤维增强塑料（FPR）力筋的应用，它将解决在腐蚀环境下预应力结构的耐久性问题。几十年来，科学研究者和工程师们精益求精的研究和更加大胆的设计使得预应力结构日新月异、五彩缤纷，预应力技术在土木工程领域已经扮演着极为重要的角色。

本书是在作者近 20 年的教学与科研工作的基础上编著的。编著的目的是想较系统地介绍预应力结构的理论、分析方法以及工程设计计算，并能结合我国现行有关规范的应用。本书强调结构理论的系统性，对部分预应力混凝土和无粘结预应力混凝土结构的论述较为详尽；并对当前所普遍关注的预应力混凝土结构抗震的理论、实验方法以及如何开展结构的抗震试验等作了较全面的介绍；同时对当前新兴的预应力钢-混凝土组合结构、预应力钢结构以及纤维增强塑料（FPR）力筋的预应力混凝土结构也作了简要介绍。

本书共 10 章。第 1 章论述预应力结构的概念与发展，着重于预应力混凝土的概念。第 2 章介绍了预应力混凝土结构材料与锚固体系。第 3 章介绍施加预应力的基本方法与预应力损失。第 4 章讲述全预应力混凝土结构的设计原理及工程设计算例。第 5 章讲述部分预应力混凝土的原理及分析方法，并介绍了预应力混凝土受弯构件的计算机分析方法。第 6 章讲述无粘结预应力混凝土结构，着重于无粘结预应力筋的极限应力分析与无粘结部分预应力混凝土楼盖结构的设计计算。第 7 章介绍预应力混凝土超静定结构，主要论述预加力的次力矩、徐变及其内力、内力重分布以及预应力混凝土连续梁的平衡设计法等问题。第 8 章论述预应力混凝土结构抗震的理论、实验方法、并介绍预应力混凝土框架与节点的拟静力和拟动力试验实例。第 9 章论述预应力钢-混凝土组合结构，并简要介绍了预应力钢结构。第 10 章介绍了纤维增强塑料（FPR）力筋的预应力混凝土结构原理及当前的应用。

本书以发展和辩证的观点来编著，在理论阐述方面力求概念清晰、条理清楚。在各章的主要内容中都反映了该领域的国内外研究的最新成果，以及国内外主要现行规范的规定条款。本书的编著虽然以预应力结构理论的提高部分为重点，但涵盖了基本理论的内容，并在各有关章节都列举了工程设计算例，因此，不仅适用于研究生与本科的教学，也适用

于科研以及工程的设计与施工。

在本书编著中，陈红媛、许莉、郑则群、程浩德、上官萍、陈国栋、李旭红等参与了插图与算例等工作，在此一并致谢。

由于作者水平所限，本书的不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

房贞政

2005年5月 于福州大学

目 录

第 1 章 预应力结构的概念与发展	1
§ 1.1 预应力混凝土的基本原理	1
§ 1.2 预应力混凝土的新概念	2
§ 1.3 加筋混凝土的分类与预应力度	4
§ 1.4 预应力结构应用的发展	7
第 2 章 预应力混凝土材料与锚固体系	10
§ 2.1 混凝土材料的发展	10
§ 2.2 预应力钢筋	17
§ 2.3 锚固张拉体系与锚具	22
第 3 章 施加预应力的基本方法与预应力损失	31
§ 3.1 施加预应力的基本方法	31
§ 3.2 预应力损失	33
§ 3.3 预应力损失研究方法概述	41
第 4 章 预应力混凝土受弯构件的设计计算	45
§ 4.1 混凝土结构设计的基本原理	45
§ 4.2 预应力混凝土受弯构件的受力特性	52
§ 4.3 预应力混凝土受弯构件斜截面抗剪强度	57
§ 4.4 预应力混凝土构件的局部受压承载力	65
§ 4.5 预应力混凝土受弯构件的设计计算	69
第 5 章 部分预应力混凝土结构	92
§ 5.1 概述	92
§ 5.2 部分预应力混凝土受弯构件正截面强度	96
§ 5.3 正常使用阶段开裂截面的应力分析	102
§ 5.4 混凝土受弯构件正截面受力分析的计算机方法	107
§ 5.5 裂缝的控制与计算	113
§ 5.6 部分预应力混凝土受弯构件变形计算	122
§ 5.7 部分预应力混凝土受弯构件的设计	125
第 6 章 无粘结预应力混凝土结构	133
§ 6.1 概述	133
§ 6.2 无粘结预应力筋的极限应力	134
§ 6.3 无粘结预应力混凝土梁的极限弯矩	142
§ 6.4 无粘结预应力混凝土梁的斜截面抗剪强度	144
§ 6.5 无粘结预应力混凝土梁的裂缝及抗震构造	147
§ 6.6 无粘结预应力混凝土梁的设计	153

§ 6.7	无粘结预应力混凝土楼盖	158
第 7 章	预应力混凝土超静定结构	168
§ 7.1	预应力超静定结构的次内力	168
§ 7.2	线性变换与吻合力筋	176
§ 7.3	预应力混凝土超静定梁的徐变及其内力	178
§ 7.4	预应力混凝土连续梁的弯矩重分布	192
§ 7.5	预应力混凝土连续梁的平衡设计法	199
§ 7.6	预应力混凝土结构的有限元分析方法	205
第 8 章	预应力混凝土结构的抗震设计与研究	211
§ 8.1	概述	211
§ 8.2	预应力混凝土结构抗震的一般规定	212
§ 8.3	结构抗震设计方法	217
§ 8.4	预应力混凝土结构抗震设计要求	223
§ 8.5	预应力混凝土结构抗震试验方法	234
§ 8.6	预应力混凝土结构抗震试验研究	245
第 9 章	预应力钢—混凝土组合结构与预应力钢结构	273
§ 9.1	概述	273
§ 9.2	预应力钢—混凝土组合梁的受力性能与分析计算	275
§ 9.3	钢—混凝土组合梁剪力连接件设计	290
§ 9.4	预应力钢—混凝土组合梁的疲劳与稳定	294
§ 9.5	预应力钢—混凝土组合梁的设计算例	301
§ 9.6	预应力波纹钢腹板混凝土组合结构	306
§ 9.7	预应力空间钢结构的应用	313
§ 9.8	预应力钢结构施加预应力的主要方法与设计原则	317
§ 9.9	预应力空间钢结构工程实例简介	321
第 10 章	纤维增强塑料 (FRP) 预应力筋结构	327
§ 10.1	FRP 力筋的材料与锚具	327
§ 10.2	FRP 筋预应力结构设计计算方法与原则	331
§ 10.3	FRP 预应力筋结构的应用	342
	主要参考文献	345

contents

Chapter 1	The ideas and development of prestressed concrete	1
§ 1.1	Principle of prestressed concrete	1
§ 1.2	The new ideas of prestressed concrete	2
§ 1.3	Catalog of prestressed concrete and prestressing degree	4
§ 1.4	Development of prestressed structures application	7
Chapter 2	Materials for prestressed concrete and anchorage system	10
§ 2.1	Development of concrete materials	10
§ 2.2	Prestressing steel	17
§ 2.3	Anchorage system and anchors	22
Chapter 3	Basic methods of prestressing and losses of prestress	31
§ 3.1	Basic methods of prestressing	31
§ 3.2	Losses of prestress	33
§ 3.3	Analysis methods of prestress loss	41
Chapter 4	Design calculation of prestressed concrete structures	45
§ 4.1	Design principle of concrete structures	45
§ 4.2	Analysis of prestressed concrete bending member	52
§ 4.3	Shear capacity of prestressed concrete bending member	57
§ 4.4	Local compress capacity of prestressed concrete member	65
§ 4.5	Design calculation of prestressed concrete bending member	69
Chapter 5	Partially prestressed concrete structures	92
§ 5.1	Introduction	92
§ 5.2	Strength of partially prestressed concrete bending member	96
§ 5.3	Stress analysis of cracked section under serviceability limit states	102
§ 5.4	Computer methods of stress analysis of prestressed concrete bending member	107
§ 5.5	Crack calculation and control of prestressed concrete member	113
§ 5.6	Deformation calculation of partially prestressed concrete bending member	122
§ 5.7	Design of partially prestressed concrete bending member	125
Chapter 6	Unbonded prestressed concrete structures	133
§ 6.1	Introduction	133
§ 6.2	Ultimate stress of unbonded prestressing tendons	134
§ 6.3	Ultimate moment of unbonded prestressed concrete beams	142
§ 6.4	Shear capacity of unbonded prestressed concrete beams	144

§ 6.5	Crackles and constructions of unbonded prestressed concrete beams	147
§ 6.6	Design of unbonded prestressed concrete beams	153
§ 6.7	Unbonded prestressed concrete floor structures	158
Chapter 7	Indeterminate prestressed concrete structures	168
§ 7.1	Secondary moments of indeterminate prestressed concrete structures	168
§ 7.2	Linear alteration and coincidental prestressing tendons	176
§ 7.3	Creep and secondary moments of indeterminate prestressed concrete beam	178
§ 7.4	Moment redistribution of continuous prestressed concrete beams	192
§ 7.5	Balance design method for continuous prestressed concrete beams	199
§ 7.6	Finite element method for prestress concrete structures	205
Chapter 8	Aseismic design and study of prestressed concrete structures	211
§ 8.1	Introduction	211
§ 8.2	General aseismic provision for prestressed concrete structures	212
§ 8.3	Structure analysis methods resulted from earthquake	217
§ 8.4	Aseismic design requirements of prestressed concrete structures	223
§ 8.5	Aseismic experiment methods for prestressed concrete structures	234
§ 8.6	Aseismic experiment study for prestressed concrete structures	245
Chapter 9	Composite structures of prestressed steel and concrete and prestressed steel structures	273
§ 9.1	Introduction	273
§ 9.2	Behaviors of composite structures of prestressed steel and concrete	275
§ 9.3	Design of shear connectors	290
§ 9.4	Fatigue and stability of composite structures of prestressed steel and concrete	294
§ 9.5	Design example of composite structure of prestressed steel and concrete	301
§ 9.6	Prestressed concrete structures with corrugated steel web	306
§ 9.7	Application of prestressed steel structures	313
§ 9.8	Basic methods and design principles of prestressed steel structures	317
§ 9.9	Engineering examples of prestressed steel structures	321
Chapter 10	Prestressed concrete structures with FRP	327
§ 10.1	Development of FRP tendons	331
§ 10.2	Principals and design method of prestressed concrete with FRP	331
§ 10.3	Application of prestressed concrete structures with FRP	342
Consult Document	345

第 1 章 预应力结构的概念与发展

§ 1.1 预应力混凝土的基本原理

当今预应力技术已经广泛地应用于土木工程的各个领域，尤其是在桥梁结构与大跨房屋结构中的应用更是日新月异。纵观预应力技术的历史与发展，从 20 世纪 20 年代预应力技术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。在进入 21 世纪后预应力技术不仅被应用于混凝土构件，还被出色地应用于钢-混凝土组合结构、空间钢结构等领域，预应力技术的发展更是进入灿烂辉煌、五彩缤纷的时期。

预应力混凝土结构是由普通钢筋混凝土结构发展而来，早期预应力混凝土进入实用阶段应当归功于法国杰出的工程师弗来西奈 (Freyssinet)，他在 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度钢材和高强混凝土。第二次世界大战后，预应力混凝土的生产蓬勃发展，20 世纪 70 年代预应力混凝土更是在土建结构的各个领域扮演着它的重要角色。随着无粘结筋的出现以及部分预应力概念为工程师们所接受之后，预应力混凝土结构又得到了一次飞跃的发展，并使自身更加完善。预应力混凝土结构已经从传统的全预应力混凝土结构发展到部分预应力混凝土结构、无粘结预应力混凝土结构、预应力钢-混凝土组合结构以及预应力空间钢结构等。结构工程师们精益求精的研究和更加大胆的设计，使预应力新结构层出不穷、日新月异。

虽然预应力混凝土在 20 世纪 20 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被聪明的祖先应用了。当时的藤或铁箍木桶就是一个很好的例子，如图 1-1 所示，铁箍（或藤箍）给松散的木桶拼板施加一定的压力，使其形成木桶能够承受足够的侧向水压力，这就是早先的预应力原理。

预应力混凝土的应用主要是克服混凝土受拉强度低以及应用高强度钢材。对于钢筋混凝土受拉与受弯构件，由于混凝土的强度及极限拉应变值都很低，一般其极限拉应变约为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.15 \times 10^{-3}$ ，因此，正常使用状态通常是带裂缝工作的。而对于不允许开裂的构件，其受拉钢筋的应力达到 $20 \sim 30 \text{ N/mm}^2$ ；对于允许开裂的构件，通常当受拉钢筋应力达到 250 N/mm^2 时，裂缝宽度已达到 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ ，此时构件的耐久性有所降低，同时也不宜用于高湿度或具有腐蚀性的工作环境。为了避免钢筋混凝土结构的裂缝过早出现，充分利用高强度钢筋及高强度混凝土，可以设法在结构构件受荷载作用

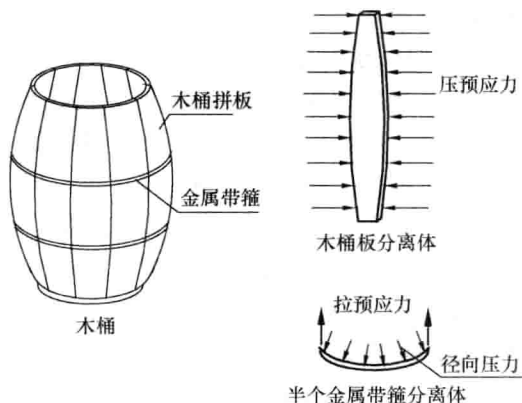


图 1-1 预应力原理图

前，使它产生预压应力来减少或抵消荷载所引起的混凝土拉应力，从而使结构构件的拉应力不大，甚至处于受压状态。预应力混凝土梁的工作原理可从图 1-2 予以说明。

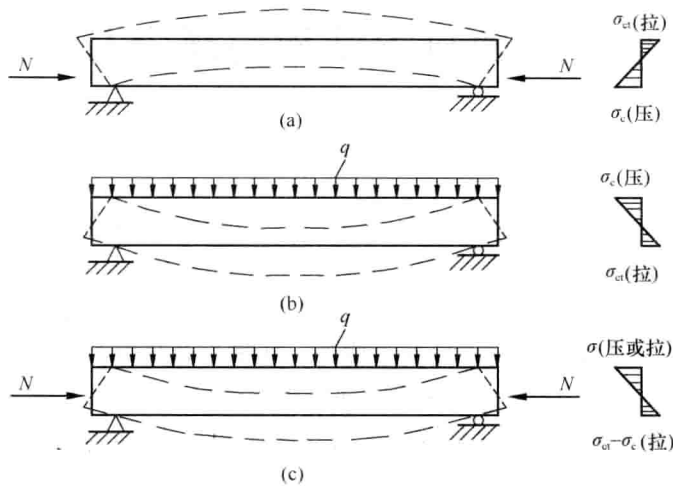


图 1-2 预应力混凝土简支梁

(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

图 1-2 所示为一预应力混凝土简支梁，在荷载作用之前，预先在梁的受拉区施加偏心压力 N ，使梁下边缘混凝土产生预压应力为 σ_c ，梁上边缘产生不大的预拉应力 σ_{st} ，见图 1-2 (a)。当荷载 q (包括梁自重) 作用时，如果梁跨中截面下边缘产生拉应力 σ_{st} ，梁上边缘产生压应力 σ_c ，见图 1-2 (b)。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 $\sigma_{st} - \sigma_c$ ，梁上边缘应力一般为压应力，但也有可能为较小的拉应力，见图 1-2 (c)。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。

预应力混凝土构件具有较多的优点，但其不足之处也是存在的，其主要缺点是构造、施工和计算均较钢筋混凝土构件要求更高，且延性也相对差些。目前预应力混凝土主要应用于：(1) 要求裂缝控制等级较高的结构；(2) 大跨度或受力较大的构件；(3) 对构件的刚度和变形控制要求较高的结构构件。预应力混凝土结构在大跨度梁式桥和工业厂房中的吊车梁等结构中的应用最广泛。

§ 1.2 预应力混凝土的新概念

预应力混凝土的应用进入成熟阶段后，人们不仅对预应力混凝土的原理有了明确的认识，同时对预应力混凝土的概念也有了更深刻的解释。如 T. Y. Lin (林同炎，1912 ~ 2003) 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. 预加力使混凝土成为弹性材料的概念

预加应力使混凝土成为弹性材料的概念是将预应力混凝土构件看作混凝土经过预压后

从原先抗拉弱、抗压强的脆性材料变为一种既能抗拉又能抗压的弹性材料。因此，混凝土被看作承受两个力系，即内部预应力和外部荷载。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。在正常使用状态下混凝土都没有裂缝出现，甚至没有拉应力出现，这正是全预应力混凝土结构的情形。因此，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。

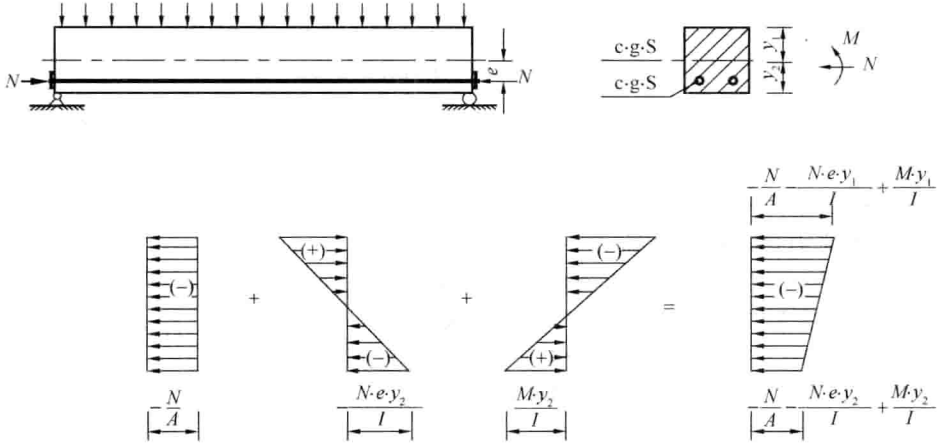


图 1-3 偏心预应力混凝土截面的应力分布

如图 1-3 所示，一偏心施加预应力的混凝土梁，在预加力 N 作用下，混凝土截面的应力为：

$$\sigma = -\frac{N}{A} \pm \frac{N \cdot e_p \cdot y}{I} \quad (1-1)$$

当外荷载（包括梁自重）对梁某一截面引起的力矩为 M ，该截面的应力为：

$$\sigma = \mp \frac{M \cdot y}{I} \quad (1-2)$$

在两个力系共同作用下，截面内任一点的应力为：

$$\sigma = -\frac{N}{A} \pm \frac{N \cdot e_p \cdot y}{I} \mp \frac{M \cdot y}{I} \quad (1-3)$$

应力 σ 负值表示压应力，正值代表拉应力。

式中 A —— 构件截面积；

I —— 构件截面惯性矩；

e_p —— 预应力筋的偏心距。

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的概念

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的概念是将预应力混凝土构件看作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，用钢筋承受拉力及混凝土承受压力以形成一个抵抗外力矩的力偶，如图 1-4 所示。

在预应力混凝土结构中采用的是高强钢筋。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，那么在工作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宽裂缝和大挠度。因此，用在预应力混凝土中的高强钢筋必须与混凝土结

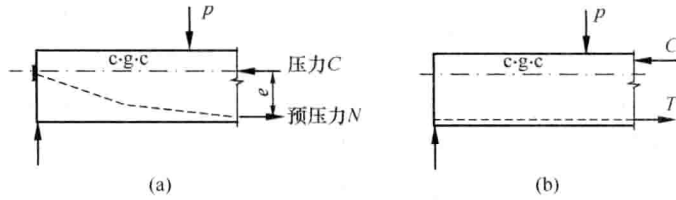


图 1-4 预应力混凝土与钢筋混凝土梁内的内部抵抗力矩
(a) 预应力梁的部分；(b) 钢筋混凝土梁的部分

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，所以预应力混凝土又可看成是钢筋混凝土应用的扩展，这一概念清晰地告诉我们：预应力混凝土也不能超越材料本身强度的能力。

3. 施加预应力是实现部分荷载平衡的概念

施加预应力是实现部分荷载平衡的概念将施加预应力看作是试图平衡构件上的部分或

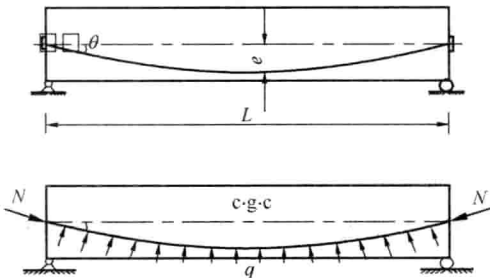


图 1-5 抛物线形配筋的预应力梁

全部的工作荷载。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 1-5 所示的抛物线形设置预应力筋的简支梁，在预加力 N 作用下，梁体可以看成承受向上的均匀荷载

$$q = \frac{8N \cdot e}{l^2} \quad (1-4)$$

以及轴向力 N 。如果作用在梁上也是荷载集度为 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 T. Y. Lin 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。

对于同一个预应力混凝土可以有三种不同的概念，它们之间并没有相互的矛盾，它们仅仅是从不同的角度来解释预应力混凝土的原理。预加应力使混凝土成为弹性材料的概念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的概念则可看成是强度理论，它指出预应力混凝土也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的概念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。这三种不同的概念恰恰为预应力混凝土结构的弹性设计、塑性设计以及平衡设计提供了理论依据。

§ 1.3 加筋混凝土的分类与预应力度

钢筋混凝土与预应力混凝土在很长的时期内都是被区分为两个系列的构件，只是在部分预应力混凝土出现之后，人们逐渐将预应力混凝土与普通钢筋混凝土划分为统一的加筋混凝土系列。目前，国际上与我国对整个加筋混凝土系列按照受力性能及变形情况分为若

干个等级，但稍有差别。国内外在对加筋混凝土分类的同时又对预应力混凝土构件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，提出了预应力度度的概念。

1.3.1 加筋混凝土的分类

1. 国外对加筋混凝土的分类

1970年国际预应力协会（FIP），欧洲混凝土委员会（CEB）根据预应力程度大小的不同，建议将加筋混凝土分为四个等级：

I级 全预应力——在全部荷载最不利组合作用下，混凝土不出现拉应力；

II级 有限预应力——在全部荷载最不利组合作用下，混凝土允许出现拉应力，但不超过其弯拉强度；在长期持续荷载作用下，混凝土不出现拉应力；

III级 部分预应力——在全部荷载最不利组合作用下，构件的混凝土允许出现裂缝，但裂缝宽度不超过规定值；

IV级 普通钢筋混凝土结构。

这种分类是以全预应力混凝土与普通钢筋混凝土为两个边界，设计者可以根据对结构功能的要求和所处的环境条件，合理选用预应力度，以求得最优结构设计方案。这种等级的划分不能认为是质量等级的划分。预应力混凝土结构质量的优劣主要取决于它的使用性能、承载力和耐久性等，而不取决于预应力度度的高低。

2. 我国对加筋混凝土的分类

中国土木工程学会《部分预应力混凝土结构设计建议》（1986年，以下称《PPC建议》）按照预应力度分为全预应力、部分预应力和钢筋混凝土三类。其中部分预应力包括国际分类法的II级有限预应力与III级的部分预应力。因此，部分预应力是指介于全预应力和钢筋混凝土结构为两个边界的中间广阔领域的预应力混凝土结构。而部分预应力混凝土又分为A类构件与B类构件，A类构件指的是在正常使用极限状态构件的预压受拉区混凝土的正截面拉应力不超过规定的限值。B类构件则是混凝土的正截面拉应力允许超过规定的限值，但当出现裂缝时，其裂缝宽度不超过允许的限值。

不管对预应力混凝土如何进行分类，它都与预应力混凝土构件被施加的预应力的程度有关。因此，近年来，国际上逐步统一在用预应力度度的分类方法。我国的《PPC建议》即认为当预应力度 $\lambda=1.0$ 时为全预应力混凝土，当预应力度 $\lambda=0.0$ 时为普通钢筋混凝土，预应力度在 $0.0<\lambda<1.0$ 的都为部分预应力混凝土。

我国现行的《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62—2004对钢筋混凝土与预应力混凝土构件的分类都以裂缝的等级来区分。如《混凝土结构设计规范》对结构构件受力裂缝控制分为三级：一级——严格要求不出现裂缝的构件，按荷载标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力。二级——一般要求不出现裂缝的构件，按荷载标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土抗拉强度的标准值。三级——允许出现裂缝的构件。对预应力混凝土构件，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不应超过规范的最大裂缝宽度限定值。因此，结构构件控制等级为三级的构件大致为部分预应力混凝土构件；裂缝控制等级为一级的构件，是严格要求不出现裂缝的构件，即必须采用全

预应力混凝土。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62—2004 则规定：全预应力混凝土构件在荷载短期效应组合下，控制正截面的受拉边缘不允许出现拉应力；部分预应力混凝土构件在荷载短期效应组合下，控制正截面的受拉边缘可出现拉应力；当拉应力加以限制时，为 A 类预应力混凝土构件；当拉应力超过限制值时，为 B 类预应力混凝土构件。

1.3.2 预应力混凝土的预应力度

1. 预应力度的定义

对于受弯构件预应力度定义为：

$$\lambda = \frac{M_0}{M} \quad (1-5)$$

式中 λ —— 预应力度；

M_0 —— 消压弯矩，即使构件控制截面预压受拉边缘应力抵消到零时的弯矩；

M —— 使用荷载（不包括预加力）短期组合作用下控制截面的弯矩。

消压弯矩的定义见图 1-6 所示。

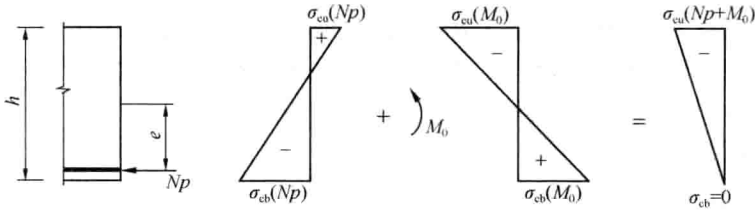


图 1-6 截面消压弯矩的定义

消压弯矩可按下式计算：

$$M_0 = \sigma_c \cdot W_0 \quad (1-6)$$

其中 σ_c —— 受弯构件在预加力作用下预压受拉边缘的有效预应力；

W_0 —— 换算截面预压受拉边缘的弹性抵抗矩。

显然，当使用荷载作用下控制截面的弯矩 M 正好等于截面的消压弯矩 M_0 时，那么预应力度 $\lambda = 1.0$ ，这就是全预应力混凝土。按照预应力度来定义则有：

全预应力混凝土 $\lambda \geq 1.0$ ；

部分预应力混凝土 $1 > \lambda > 0$ ；

钢筋混凝土 $\lambda = 0$

按上式的表达，部分预应力混凝土构件是指预应力度处在钢筋混凝土和全预应力混凝土两个极端状态之间的预应力混凝土构件。

2. 用材料强度的关系表达的预应力程度

另一种描述预应力程度的方法是以预应力混凝土构件中含有的预应力钢筋与非预应力钢筋的材料强度来表达：

$$PPR = \frac{A_p \cdot f_{py}}{A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_y} \quad (1-7)$$

式中 PPR —— 预应力程度；

- A_p ——控制截面处预应力筋的截面面积；
- A_s ——控制截面处非预应力钢筋的截面面积；
- f_{py} ——预应力筋的条件屈服强度；
- f_y ——非预应力钢筋的屈服强度。

式(1-7)表明：当预应力混凝土构件同时设置有非预应力受力钢筋时，它的预应力度 PPR 将在 $0\sim 1$ 之间，即部分预应力混凝土。当构件仅设置预应力筋时，它是全预应力混凝土。如果构件中没有设置预应力筋而仅有非预应力钢筋，则是普通钢筋混凝土。该式还表示：部分预应力混凝土是必须设置非预应力受力钢筋的。这种以材料强度概念来定义预应力度指的是在承载能力极限状态下，预应力混凝土构件中预应力筋与非预应力钢筋分别承担其拉力与内力矩的比例。

两种不同概念的预应力度，其描述的含义不同。消压概念的预应力度 λ 明确表示在正常使用极限状态构件所施加的预应力大小；而钢筋强度比的预应力程度 PPR 则表示在承载能力极限状态预应力筋和非预应力钢筋分别承担的拉力比。因此，它们是两种不同极限状态表示预应力或预应力筋强度的量纲。

§ 1.4 预应力结构应用的发展

预应力混凝土结构在土木工程领域应用的发展主要取决于预应力混凝土结构所应用的材料的发展和预应力技术的发展。近 20 年来，预应力结构的应用得到了史无前例的飞速发展，主要体现在以下几个方面。

1. 部分预应力混凝土概念的应用

预应力混凝土是由普通钢筋混凝土结构发展而来的，早期的预应力混凝土一般都指全预应力混凝土，英文称为“Prestressed Concrete”，与普通钢筋混凝土“Reinforced Concrete”含义不同，预应力混凝土不能称为预应力钢筋混凝土。但是，随着预应力结构应用的发展，人们发现全预应力混凝土并非是完美的结构，相反，在某些环境与条件下，当可变荷载占总荷载比例较大时，全预应力混凝土更显出其不足之处，如构件长期处于高压应力状态，反拱度大等缺点。因此，在预应力混凝土的应用与发展中就出现了部分预应力混凝土结构，至今，部分预应力的概念已经被人们普遍接受，并得到了广泛的应用。

预应力结构的发展包含着“否定之否定”的辩证发展规律，从钢筋混凝土发展到预应力混凝土是一次否定，它使得高强度钢材与高强度混凝土得到了协调使用，预应力混凝土提高了结构的刚度，且改善了混凝土结构的刚度与抗裂性能，并很大程度地解决了大跨度结构中应用混凝土构件的问题。部分预应力克服了全预应力混凝土长期处于高压应力状态、受徐变影响大、构件的反拱度大等缺点，同时可适度解决构件端部的锚具过于集中的问题。部分预应力混凝土结构设置一定数量的粘结非预应力钢筋，还可提高构件的延性，更有利于在地震区域的应用。因此，部分预应力混凝土不是简单地替代全预应力混凝土，而是其自身的完善与提高。部分预应力的概念使设计工程师对混凝土结构的设计更能够根据结构使用的功能有更大的选择范围。但是部分预应力混凝土不可能替代全预应力混凝土，它们分别适用于不同的环境与工作条件要求，有些工作环境是必须要使用全预应力混凝土结构的。部分预应力概念的提出使得预应力结构的应用更加广泛，它克服了全预应力混凝土的