

无粘结与部分 预应力结构

房贞政 编著



人民交通出版社

Wunianjie yu Bufen Yuyingli Jiegou

无粘结与部分预应力结构

房贞政 编著

人民交通出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

无粘结与部分预应力结构房贞政编著. —北京: 人民交通出版社, 1999. 10

ISBN 7-114-03473-3

I. 无… II. III. ①混凝土结构, 无粘结②预应力混凝土结构 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 35011 号

无粘结与部分预应力结构

房贞政 编著

版式设计: 刘晓方 责任校对: 杨 杰 责任印制: 杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.5 字数: 220 千

1999 年 10 月 第 1 版

1999 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数 0001—4000 册 定价: 19.00 元

ISBN 7-114-03473-3

TU·00060

内 容 提 要

本书讲述预应力结构的发展、预应力结构应用的材料、部分预应力混凝土、无粘结预应力混凝土结构、预应力损失、预应力混凝土超静定结构,以及预应力钢—混凝土组合结构等。书中的内容涵盖以房屋建筑和桥梁结构为主的土木工程领域。全书的编写力求理论与实践相结合,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大专院校的教师参考。

前 言

预应力结构从它进入土木工程的应用至今,已从一个婴儿成长为巨人。预应力结构的发展不论是在理论的研究、设计方法、施工工艺,还是在高强材料的应用方面都取得了巨大的成就。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,预应力混凝土结构的应用又得到了一次飞跃的发展,并使自身更加尽善尽美。精益求精的研究和更加大胆的设计又涌现出一批批五彩缤纷的作品,当今,预应力技术更是在土建结构的各个领域扮演着极为重要的角色。预应力混凝土已成为当今世界上最主要的一种土建结构材料,而部分预应力概念与无粘结预应力技术则是现代预应力结构的重要内容。本书是在作者十多年的教学与科研工作的基础上编著的,编写的目的是通过介绍现代预应力结构的发展、理论研究以及分析方法和工程设计计算,以进一步促进预应力技术的应用与发展。

本书共七章。第一章论述预应力结构的历史与发展,着重于预应力的概念及其发展。第二章简要介绍预应力结构材料的发展。第三章讲述部分预应力混凝土的原理及分析方法,介绍了预应力混凝土构件抗剪强度的分析方法,并提供了用于部分预应力混凝土受弯构件分析的计算分析程序。第四章讲述无粘结预应力混凝土结构,本章着重于无粘结预应力筋的极限应力分析与无粘结预应力混凝土楼盖结构的设计计算。第五章介绍预应力混凝土的预应力损失问题,包括损失的计算、组合及讨论。第六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、徐变与收缩变形及其内力、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。这些问题是预应力混凝土超静定结构中倍受关注的问

题。第七章论述了预应力钢—混凝土组合结构。预应力钢—混凝土组合结构是当今预应力技术应用的又一新的领域,是无粘结与部分预应力两者的结合,也是下一世纪最有应用前景的结构之一。

本书力求以发展的观点来编写,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均反映了该领域国内外研究的最新成果及国内外主要现行规范的规定条款。本书的编写以今后的土木工程专业为基点,为使本书能同时适用于教学、科研以及工程的设计与施工,在各有关章节都列举了工程设计算例。

在本书编写中,陈红媛、陈国栋、韩艳等同志参加了插图的绘制,宗周红参与了第七章的编写,在此一并致谢。

由于作者水平所限,本书的缺点与错误在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

1999年3月于福州大学

目 录

第一章 预应力结构的历史与发展	1
第一节 预应力原理的三种概念	2
第二节 预应力混凝土的等级与分类	5
第三节 预应力度	7
第二章 预应力结构材料的应用与发展	10
第一节 混凝土材料的发展	10
第二节 预应力筋	17
第三节 锚具	21
第三章 部分预应力混凝土结构	29
第一节 概述	29
第二节 部分预应力混凝土受弯构件正截面强度	34
第三节 正常使用阶段开裂截面的应力分析	55
第四节 裂缝的控制与计算	62
第五节 部分预应力混凝土受弯构件变形计算	72
第六节 部分预应力混凝土受弯构件斜截面抗剪强度	76
第七节 部分预应力混凝土构件的疲劳	93
第八节 部分预应力混凝土构件的设计	95
第四章 无粘结预应力混凝土结构	104
第一节 概述	104
第二节 无粘结预应力筋的极限应力	107
第三节 无粘结预应力混凝土梁的极限弯矩	119
第四节 无粘结预应力混凝土梁的裂缝及抗震构造	123
第五节 无粘结预应力混凝土结构的设计	132
第六节 无粘结预应力混凝土楼盖	138

第五章 预应力损失	154
第一节 预应力损失的计算	154
第二节 预应力损失计算的组合及讨论	163
第六章 预应力混凝土超静定结构	166
第一节 预应力超静定结构的次内力	166
第二节 线性变换、吻合力筋及索界	178
第三节 预应力混凝土超静定梁的徐变及其内力	184
第四节 预应力混凝土连续梁的内力重分布	200
第五节 预应力混凝土连续梁的平衡设计法	210
第七章 预应力钢—混凝土组合结构	219
第一节 概述	219
第二节 预应力钢—混凝土组合梁的受力性能与 分析计算	222
第三节 剪力连接件设计	239
第四节 预应力钢—混凝土组合梁的疲劳与稳定	245
第五节 预应力钢—混凝土组合梁设计算例	252
参考文献	258

第一章 预应力结构的历史与发展

纵观预应力结构的历史与发展,从它进入土木工程的实际应用,即从本世纪 20 年代诞生到本世纪末,已经从一个婴儿成长为巨人^[1]。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需采用高强钢材和高强混凝土。第二次世界大战后,预应力混凝土得到蓬勃发展,70 年代后预应力混凝土更是在土建结构的各个领域扮演着重要的角色。精益求精的研究和更加大胆的设计又涌现出五彩缤纷的先进预应力结构,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,并使自身更加完美。

虽然预应力混凝土在本世纪 20 年代才进入实际应用阶段,但是,预应力的基本原理大概几个世纪以前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,图 1-1 就是早先的预应力原理。随着预应力混凝土的应用,人们对预应力混凝土的认识又有了新的

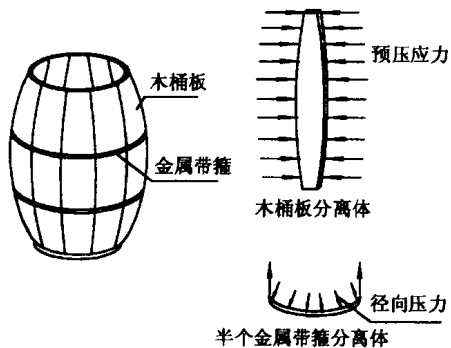


图 1-1 预应力原理图

概念。T.Y.Lin 教授曾对预应力混凝土的原理总结了三种不同的概念。

第一节 预应力原理的三种概念

第一种概念——预加应力使混凝土为弹性材料

这一概念把预应力混凝土基本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。由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没有裂缝出现,甚至没有拉应力出现。这是全预应力混凝土结构的情形,在这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。

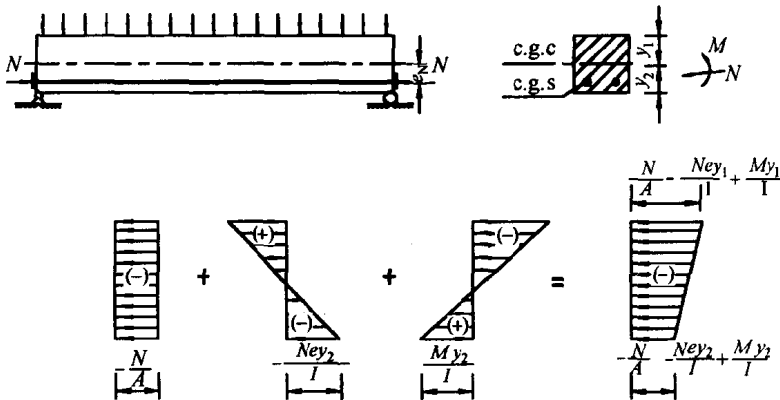


图 1-2 偏心预应力混凝土截面的应力分布

如图 1-2 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:

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

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:

$$\sigma = \mp \frac{My}{I} \quad (1-2)$$

在两个力系共同作用下,截面内任一点的应力为:

$$\sigma = -\frac{N}{A} \pm \frac{Ne_{NY}}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (1-3)$$

式中:应力 σ ——负值表示压应力,正值代表拉应力。

第二种概念——预加应力使高强钢材与混凝土能共同工作

这种概念是将预应力混凝土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、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

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在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的强度极限。

第三种概念——预加应力实现荷载平衡

这种概念把预加应力的作用主要看作是试图平衡构件上的部分或全部的工作荷载。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 1-4 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:

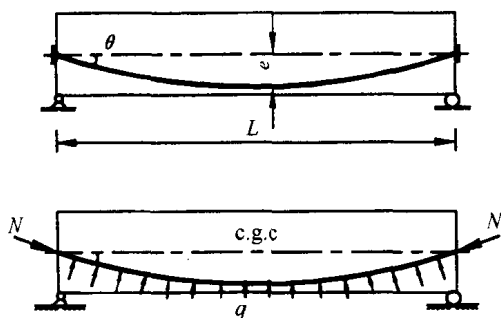


图 1-4 抛物线形配筋的预应力梁

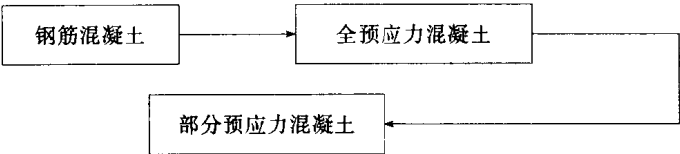
$$q = \frac{8Ne}{l^2} \quad (1-4)$$

以及轴向 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,那末,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个不同的概念,它们之间并没有相互的矛盾,仅仅是从不同的角度来解释预应力混凝土的原理。第一种概念正是全预应力混凝土弹性分析的依据;第二种概念则是强度理论,它指出预应力混凝土也不能超越其材料自身强度的界限;第三种概念则为复杂的预应力混凝土结构的设计与分析提供了简捷的方法。

预应力混凝土是在普通钢筋混凝土结构上发展起来的,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,如可变荷载占总荷载比例较大时,全预应力混

凝土也有不足之处,如构件长期处于高压应力状态、反拱度大等缺点。因此,在预应力混凝土发展中就出现了部分预应力混凝土结构,而且,部分预应力的概念逐渐被人们所接受。



从上图可以发现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,改善了混凝土结构的抗裂性能,并在大跨度结构中得到广泛应用。而部分预应力则是对全预应力的否定,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、构件的反拱度大以及在构件端部的锚具过于集中等缺点,并且在设置一定数量的粘结非预应力钢筋时提高了结构的延性。这种否定不是简单的替代,而是自身的完善与提高。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。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。

第二节 预应力混凝土的等级与分类

以钢材为配筋的预应力混凝土实际上与普通钢筋混凝土同属于一个统一的加筋混凝土系列,国际上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。

一、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、强度和耐久性，而不取决于预应力度的高低。

二、中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进行分类的方法。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 $\lambda = 0$ 时为普通钢筋混凝土，预应力度在 $0 < \lambda < 1.0$ 的为部分预应力混凝土。

第三节 预应力度

一、预应力的定义

对于受弯构件预应力度定义为：

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

式中： 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。

消压弯矩的定义如图 1-5 所示。

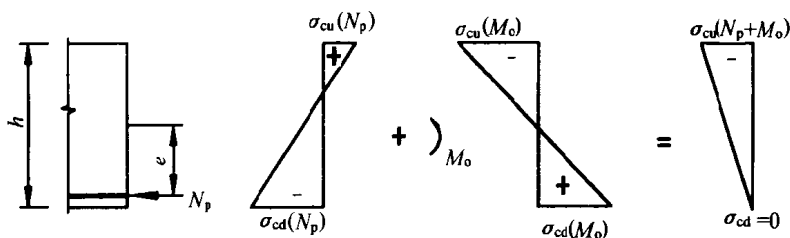


图 1-5 截面消压弯矩的定义

消压弯矩可按下式计算：

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

式中： 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，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。

二、用材料强度的关系来表达的预应力度

另一种描述预应力度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:

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

式中: 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)明确表示:当预应力混凝土构件同时设置有非预应力受力钢筋时,它的预应力度将在 0~1 之间,即为部分预应力混凝土。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。

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不足之处,提高了结构的延性,使结构设计既经济又合理。预应力结构应用与发展中另一个重要的飞跃是无粘结预应力技术的发展与成熟。应当说无粘结预应力技术早在本世纪 30 年代就出现了,如德国的 Dischinger 应用无粘结预应力技术建造了 Aue/Sachsen 桥。70 年代后,随着无粘结筋生产工艺和无粘结预应力技术的成熟,无粘结预应力混凝土在土木工程领域,尤其在房屋建筑中得到了相当广泛的应用。无粘结预应力混凝土在多高层楼盖结构中的应用,特别是在大开间、大柱网结构中

的应用已经取得了丰富的实践经验。近年来,我国无粘结预应力混凝土在楼盖结构中的应用正以每年百万平方米的速度增长。随着预应力技术的日益成熟,它不仅用于加筋混凝土,也应用于钢结构、组合结构,甚至砖石结构。随着建筑功能对结构性能的要求逐步提高,预应力钢—混凝土组合结构又出现在土木建筑的舞台。预应力钢—混凝土组合结构不仅结构性能优越、抗震性能好、更能充分发挥材料的强度,而且施工方便、速度快,需要拆建时,建筑垃圾少。因此,可以预见在环境保护、生态意识和可持续发展的观念越来越受重视的下一个世纪,预应力钢—混凝土组合结构的应用将更加广泛。在我国,预应力钢—混凝土组合结构的应用方兴未艾,图 1-6 为某会堂观众厅 35m 跨度的预应力钢—混凝土组合简支梁(图中混凝土上翼板还未浇筑)。



图 1-6 预应力钢—混凝土组合简支梁

预应力结构的发展在设计概念、施工工艺以及高强材料的应用和锚固技术等方面都取得了巨大的成就。在预应力结构理论方面,今后将更趋于理论与计算方法的统一性,并与国际接轨。在设计与研究方面,预应力结构的裂缝控制问题、疲劳问题、抗震问题以及耐久性和环境保护等将成为需要突出解决的问题。