



部分预应力混凝土 结构设计原理

肖光宏 杨丽梅 编著 江炳章 主审

重庆大学出版社

部分预应力混凝土结构 设计原理

肖光宏 杨丽梅 编著
江炳章 主审

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书根据国内外实践经验及最新科研成果，并结合国家标准《混凝土结构设计规范 GBJ10—89》和交通部新桥规《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 JTJ023—85》编写而成，主要介绍部分预应力混凝土结构的基本原理、材料性能，部分预应力混凝土结构正截面、斜截面设计计算以及挠度、裂缝验算，并对无粘结部分预应力混凝土的基本原理和设计计算也作了介绍。

本书可供土建工程技术人员、结构设计人员、科研人员以及高校教师学习参考，也可供结构专业学生作为教材使用。

部分预应力混凝土结构设计原理

肖光宏 杨丽梅 编著

江炳章 主审

责任编辑 曾令维

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

花溪印制厂印刷

开本：787×1092 1/32印张：4.75 字数：107千

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数：1—3000

标准书号：ISBN 7-5624-0557-3 定价：2.50元

TU·18

(川)新登字020号

前 言

在工程上，预应力混凝土应用极为广泛，可以说是无处不见它的身影。随着全预应力混凝土不断暴露其缺点，部分预应力混凝土应运而生，并得到一定发展。部分预应力混凝土采用预应力钢筋和非预应力钢筋混合配筋，兼有全预应力混凝土和钢筋混凝土两者的优点，不仅节省材料，经济、延性好，而且能够有效地控制使用状态下的结构行为（应力、裂缝和变形），被工程界认为是很有发展前途的一种结构。在国外，一些规范已纳入了有关部分预应力混凝土结构设计的条文，并修建了不少部分预应力混凝土结构工程。在我国，国家标准《混凝土结构设计规范 GBJ10—89》已允许某些混凝土构件按开裂的预应力混凝土——部分预应力混凝土设计。交通部规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 JTJ023—85》不仅给出了部分预应力混凝土的定义，还提出了一些具体的计算公式和计算方法，国内也有一些工程按部分预应力混凝土结构设计，并获得成功。因此，大量设计部分预应力混凝土结构的时代已为期不远。

本书比较系统地介绍了部分预应力混凝土的发展、分类，部分预应力混凝土的基本原理、材料性能以及部分预应力混凝土构件正截面、斜截面设计，挠度、裂缝验算和无粘结部分预应力混凝土的基本原理及设计计算，以期能帮助读者认识、掌握部分预应力混凝土这一新兴结构。同时希望本书能对推广部分预应力混凝土结构的应用起一定促进作用。本书的最大特点是根据重庆交通学院的最新科研成果，编入

了有关有粘结和无粘结部分预应力混凝土梁斜截面的设计内容。

本书可供土建工程结构设计人员、科研人员以及高等院校有关专业的师生学习参考。

本书第一、四、五、六章由重庆交通学院肖光宏撰写，第二、三、七章由重庆交通学院杨丽梅撰写，全书由重庆交通学院江炳章教授审阅。

由于我们水平有限，书中难免有一些不恰当及错误之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

1992年3月

目 录

第一章	绪论	(1)
第一节	部分预应力混凝土的发展	(1)
第二节	预应力混凝土的分类	(3)
第三节	预应力度及预应力度选择	(7)
第四节	部分预应力混凝土的优点	(9)
第二章	基本设计原则及方法	(13)
第一节	各种计算方法	(13)
第二节	极限状态法	(15)
第三节	部分预应力混凝土结构计算原则	(31)
第三章	材料	(35)
第一节	钢材	(35)
第二节	混凝土	(44)
第四章	部分预应力受弯构件正截面设计	(48)
第一节	部分预应力梁各工作阶段的受力分析	(48)
第二节	截面选择及钢筋布置	(51)
第三节	预应力损失	(62)
第四节	部分预应力混凝土梁正截面设计及强度计算	(73)
第五节	部分预应力混凝土梁的应力验算	(84)
第六节	部分预应力混凝土构件的疲劳	(92)
第五章	部分预应力混凝土梁的斜截面强度	(97)
第一节	斜截面的破坏	(97)
第二节	影响部分预应力混凝土梁抗剪强度的因素	(99)
第三节	斜截面抗剪强度计算	(105)
第六章	裂缝计算及挠度计算	(109)
第一节	裂缝计算理论	(109)

第二节	裂缝的计算	(110)
第三节	斜裂缝宽度计算	(117)
第四节	变形验算	(119)
第七章	无粘结部分预应力混凝土的发展及应用	(122)
第一节	无粘结预应力及部分预应力混凝土的发展	(122)
第二节	无粘结预应力混凝土梁的使用性能	(123)
第三节	无粘结部分预应力混凝土的构造要求及其可靠性	(129)
第四节	部分预应力混凝土梁板中无粘结筋极限应力的理论计算	(133)
第五节	无粘结部分预应力混凝土梁的设计	(137)
参考文献		(144)

第一章 绪 论

第一节 部分预应力混凝土的发展

从19世纪20年代水泥出现以来，随着社会的发展、生产的需要，结构混凝土的应用得到了巨大的发展。其发展史可划分为三个阶段，第一阶段中，在混凝土内加入钢筋而产生了钢筋混凝土，于是结构混凝土第一次以合格的复合材料的身份登上了建筑材料的历史舞台；第二阶段中，通过钢筋对混凝土进行力学处理而产生了预应力混凝土，它使得结构混凝土成为一种具有强大生命力而可与其它任何材料媲美的新型材料；第三阶段中，突破了全预应力混凝土的概念而发展了兼有全预应力和普通钢筋混凝土两种结构优越性的部分预应力混凝土，使得结构混凝土的发展日趋完善，成为当今的一种主要建筑材料而普及于全世界。

预应力的基本思想就是人为地造成内应力以抵抗使用过程中产生的应力，这种技术在日常生活中也经常可见，如套紧铁箍的木桶、张紧的自行车轮子的辐条，绞紧绳索的木锯等。将预应力思想首先应用于混凝土的则是美国工程师 P. H. Jackson，他于19世纪80年代在钢筋混凝土拱内张紧钢拉杆作楼板，并获得专利，接着德国的 C. E. Doehring 也获得了在楼板受荷前用已施加预应力的钢筋来加强混凝土的专利，但这些早期的尝试都由于未认识到混凝土的收缩徐变变形会产生过大的预应力损失而未能获得成功，直到1928

年法国工程师弗来西奈(Fregssient)在总结前人经验的基础上,认识到徐变对预应力损失的影响,提出了预应力混凝土必须采用高强度钢材和高强混凝土之后,预应力混凝土才进入实用阶段。

按照弗来西奈的见解,施加预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”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出现拉应力的预应力混凝土,后来被称作“全”预应力混凝土。

部分预应力混凝土的想法,早在30年代末就提出来了。奥地利的恩丕格(V. Emperger)于1938年提出了对钢筋混凝土附设少量预应力筋以改善裂缝和挠度性能的“部分”预应力概念。英国的艾培例斯(P. W. Abeles)又进一步提出,在全部使用荷载下允许混凝土出现拉应力,甚至出现微细裂缝的为更具体的“部分”预应力设计概念。但弗来西奈对此力加反对,他认为“全”预应力混凝土与普通钢筋混凝土之间的中间状态的东西,其性能都赶不上“全”预应力混凝土或普通钢筋混凝土。由于弗来西奈是公认的预应力混凝土的创始人,他的意见受到国际上的普遍尊重,这就给“部分”预应力混凝土的发展增加了不少阻力。过去许多国家的设计规范都只纳入“全”预应力,对“部分”预应力则很少接触,基本上处于被否定或微不足道的地位。尽管如此,“部分”预应力还是以其他形式出现,实际上早就大量推开了。例如苏联和我国于50年代开始采用的抗裂安全系数法,所设计的严格要求不开裂的结构,基本上都是“部分”预应力的;所

设计的一般要求不开裂的结构则全都是“部分”预应力的。

又例如德意志联邦共和国1951年的DIN4227规范中就采纳了允许混凝土出现拉应力的“有限预应力”，并修建了不少“有限预应力”桥梁，容许 2N/mm^2 的拉应力，这些桥梁工作情况很好。十几年前瑞士开始用预应力度更低的部分预应力，也得到良好的结果。

实践中全预应力混凝土暴露出来的缺点，使人们更多地注意到结构混凝土设计的经济性和安全性，并探求如何得到使用性能最好的结构物，于是对非全预应力混凝土结构的各种问题进行了不断的探讨和试验并取得了丰富的经验。部分预应力的思想在后来也为弗来西奈所接受，他承认：“对于结构拥有的寿命期间，在施加两倍于实际荷载的最不利机率不到万分之一的道路桥梁中，混凝土出现约 5.0MPa 左右的拉应力是没有什么缺点的。因此，硬要避免出现拉应力，这将纯粹是浪费国家钱财。1962年在罗马召开的国际预应力混凝土协会(FIP)和欧洲混凝土委员会(CEB)的联合会议(以下简称为FIP-CEB)上，对降低预应力混凝土的抗裂性要求进行了热烈讨论，首次提出将预应力混凝土和钢筋混凝土之间的中间状态连贯起来的设计思想，引起大家的注意。1970年在布拉格召开的FIP-CEB会议上，已经有足够的试验和实践资料将结构混凝土按预应力度分级，并列入国际建议中。

第二节 预应力混凝土的分类

根据1970年FIP-CEB第六届会议的混凝土结构设计与施工建议，混凝土结构分为：

I级——全预应力：在使用荷载最不利组合下不容许混凝土出现弯曲拉应力。

II级——有限预应力：在全部荷载作用时容许出现低于混凝土抗拉强度的弯曲拉应力，但在持续荷载作用时应避免出现拉应力。

III级——部分预应力：对拉应力无限制，但必须控制裂缝宽度。

此外，并将钢筋混凝土列为第IV级。

在日本为了扩大钢筋混凝土的应用范围，研究了在钢筋混凝土构件中引入比较少量的预应力，以改善裂缝情况，并称之为预应力钢筋混凝土，这种方法应用在桥梁设计中，已建成若干座桥梁。

目前各类结构混凝土对拉应力和开裂的限制见表1-1。

表1-1 结构混凝土的分类

名 称	FIP-CEB 分 类	预 加 应 力	拉 应 力		开 裂	
			经 常 荷 载	设 计 最 大 荷 载	经 常 荷 载	设 计 最 大 荷 载
全预应力混凝土	I	有	无	无	无	无
有限预应力混凝土	II	有	无	有	无	无
部分预应力混凝土	III	有	有	有	无	有
钢筋混凝土	IV	无	有	有	有	有

这一分类法虽然得到国际上的普遍赞同，但部分预应力的定义并未得到统一，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，而后者只承认III级为部分预应力。

由于这种分类法对部分预应力的优越性强调不够，容易

造成错觉，会误认为这是质量的等级，似乎Ⅰ级比Ⅱ级好，Ⅱ级比Ⅲ级好，造成盲目要求采用Ⅰ级的后果，于是，产生摒弃上述分类法的意见，改为根据对结构物功能的要求合理选用预应力度度的方法。认为预应力混凝土结构质量的高低，主要取决于它的使用性能、强度和耐久性，诸如构件的反拱、挠度、裂缝、延性和抗腐蚀性能的好坏等，而不取决于预应力度度的高低。因此应制定满足结构使用性能的一些准则，作为选用预应力度和保证结构设计依据。受这一意见的影响，在CEB/FIP模式规范MC—78中又删去了四级分类法。

1982年制定的“FIP实用设计建议(草案)”从实用方便出发，对预应力度又引入了按应力状态的三类分类法，即预应力度度的范围可以从全预应力到钢筋混凝土。预应力度按任何荷载组合作用下的应力状态来下定义，即：

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：主拉应力没有达到混凝土抗拉强度设计值；
3. 部分预应力：混凝土的拉应力没有限制。

这种分类法把预应力度和荷载组合联系起来，使预应力度成为一个随荷载而改变的相对概念。例如，在正常使用极限状态，按全部荷载最不利组合(不常遇组合或短期荷载组合)时设计的一些部分预应力结构，在准永久荷载组合(长期荷载组合)时则变为全预应力或限值预应力结构。这样的分类，既方便于设计，亦有利于克服对部分预应力的一些偏见。

中国土木工程学会编《部分预应力混凝土结构设计建

议》(以下简称为《建议》)[6]以及交通部新桥规JTJ023—85(以下简称为新桥规JTJ023—85)将混凝土结构按预应力度分成全预应力,部分预应力和钢筋混凝土三大类。部分预应力采用广义定义,包括1970年CEB/FIP建议中的限值预应力与部分预应力两部分。

预应力度 d_p 的定义为

$$d_p = M_0 / M$$

式中:

M_0 ——消压弯矩,即使构件控制截面受拉边缘应力抵消到零时的弯矩。

M ——使用弯矩(不包括预加力)短期荷载组合下控制截面的弯矩。

按预应力度划分:

全预应力混凝土	$d_p \geq 1$
部分预应力混凝土	$1 > d_p > 0$
钢筋混凝土	$d_p = 0$

我国常把全预应力、部分预应力和钢筋混凝土结构总称为加筋混凝土结构系列。

可以看出,对于部分预应力混凝土构件,如何根据其结构使用要求,合理地确定构件的预应力度(d_p)是一个非常重要的问题。

为了设计的方便,新桥规JTJ023—85按照使用荷载作用下构件正截面混凝土的应力状态,又将部分预应力混凝土构件分为以下两类:

A类:正截面混凝土的拉应力不超过规定的限值,对于受弯构件:荷载组合 I 时为 $0.8f_{tk}$ (f_{tk} 为混凝土抗拉标准强度);荷载组合 II 或组合 III 时为 $0.9f_{tk}$ 。

B类：构件正截面混凝土的拉应力没有限值规定，但裂缝宽度不得超过允许限值。

除上述分类方法外，还有《建议》按照配筋情况进行分类，即把结构中同时配有一部分预应力钢筋和一部分非预应力钢筋的混合配筋混凝土结构定义为部分预应力混凝土结构，当构件中仅有非预应力钢筋而没配置受力非预应力钢筋时，则为全预应力混凝土结构；当构件中仅有非预应力钢筋时则为钢筋混凝土结构。这一分类方法无法明确构件的预加力大小及构件在使用阶段的受力性能，所以国内一般不采用这种分类法。

第三节 预应力度及预应力的选择

一、预应力度

预应力度提供了一个衡量截面预应力程度的方法，对于预应力的定义和表达式目前国内外还未统一认识，至今仍在争议，但归纳起来大致有两种，一是由瑞士Bachmann、印度Ramaswamy等人提出的定义，他们将预应力度定义为消压弯矩与最大使用弯矩之比，即 $d_p = M_0/M$ ，另一种是由美国的Naaman和瑞士的Ihurlimann等人提出的定义，他们把预应力度定义为由预应力筋承担的极限弯矩与由全部受拉钢筋（包括预应力筋与非预应力筋）承担的极限弯矩之比，即 $PPR = (M_u)_{ps} / [(M_u)_{ps} + (M_u)_s]$ 。

中国土木工程学会《建议》和交通部新桥规JTJ023-85采用前一种定义，它可以明确地把全预应力、部分预应力及钢筋混凝土区别开来，同时它不仅反映预应力的大小，

还可以反映预应力作用点的影响，前一种定义可以把钢筋混凝土、全预应力混凝土和部分预应力混凝土三者统一在预应力度上，而钢筋混凝土和全预应力混凝土只不过是部分预应力混凝土的两个极端情况。

二、预应力度的选择

使用性要求对适当选择预应力程度是很重要的，在房屋建筑中，例如对大跨度的楼盖要求在自重或自重加永久荷载作用下保持完好的平面，即后来由收缩和徐变引起的挠度应尽可能小。此时，预应力程度应当这样选择，即在这种荷载作用下，楼盖的挠度应当很小，为此选用预应力度 $d_p = 0.4 \sim 0.6$ 一般是足够的。

在桥梁和许多其他承重结构中，承载能力要考虑的全部活荷载实际上几乎不会出现。经常出现的活荷载往往只有全部使用荷载的 $0.2 \sim 0.4$ 倍，所以就使用性来说，对这部分活荷载只要避免在混凝土中产生弯曲拉应力即可，而对全部活荷载来说，则是提出容许裂缝宽度的条件，通过适当配置附加的非预应力钢筋就可以满足提出的条件。

即使是铁路桥梁和公路重型桥梁（此时动力作用或疲劳强度意义很大），对部分预应力一般不需要作专门的疲劳验算。

所以最好这样选择预应力程度，即对于经常出现的荷载或永久作用的荷载来说，在梁的边缘上不要产生或只产生很小的弯曲拉应力。

在特殊情况下，使用荷载作用下的容许变形极限可按预应力程度来确定。

对于受拉构件（也对于受弯或受纵向拉力构件），当贯

通裂缝可能损害使用性时，预应力程度 d ，有必要或最好选用 >1.0 。

在超静定结构中，内在应力和约束应力，特别是由温差 ΔT 所引起的应力，对于为限制裂缝宽度确定配筋区域有决定意义。

CEB—FIP规范1978年取消了该规范按预应力混凝土承重结构分类，而代之要求无裂缝或要求裂缝宽度限制的分类或等级。这个规范让工程师任意选择满足要求的预应力程度。

瑞士工程师建筑师协会(SLA)规范多年以来就没有规定预应力程度，而推行部分预应力，因为在实际中已经证明了部分预应力的优越性。

第四节 部分预应力混凝土的优点

部分预应力混凝土梁的特点是在全部设计荷载作用时无拉应力限度的规定，但有严格的裂缝限制条件。此外，并不是在每种荷载情况都允许出现裂缝，一般说来在恒载和经常作用的活载作用时是不容许开裂的。即或是在全部设计荷载作用之后，也要保证裂缝能够闭合。因此对梁的耐久性不会有较大的影响。部分预应力梁的优点如下：

1. 在承载能力相同的条件下，部分预应力梁少用预应力钢材。例如一个跨径48m，梁高2.8m，翼缘宽1.75m的T形梁，在自重和附加恒载 $q = 2.04\text{kN/m}$ ，活载 $p = 28.4\text{kN/m}$ 作用时，按0.35倍活载作用时混凝土边缘失去预压应力计算，Ⅲ级结构混凝土梁用11束 $12\Phi 7$ 的高强钢丝力筋，而Ⅰ级结构混凝土梁则需16束，约省31%的高强钢丝。

**深圳市铁路架桥中122孔10米跨径简支梁
按全预应力和部分预应力混凝土梁设计的比较**

表1-2

项 目 名 称	单 位	数 量	
		全预应力混凝土	部分预应力混凝土
混凝土标号	kg/cm ²	650	500
混凝土体积	m ³	20.42	20.42
7φ5钢绞线	t	2.326	—
Φ32Ⅳ级钢筋	t	—	1.841
φ22Ⅱ级钢筋	t	—	0.615
JM5—6型锚具	套	42	—
螺杆锚具	套	—	56
每孔单价*	元	27990	24980

*为每孔制梁单价，不包括其他间接费，按深圳市当时价格计。

2. 强大的预应力易于产生平行力筋的纵向水平裂缝，这些裂缝在一定程度上比垂直力筋的裂缝对结构耐久性的影响严重，因为当荷载减小时，横向裂缝减小或趋于闭合，而平行于力筋的水平裂缝是不可恢复的，从而使腐蚀成分得以渗入。部分缓应力混凝土的总预应力值较小，便于避免纵向水平裂缝的出现。

3. 由于部分预应力混凝土要求的总预应力值较小，在不增加梁体尺寸的条件下，可以采用强度较低的钢材。按照我国目前材源供应情况，选用冷拔低碳钢筋丝、冷拉Ⅱ级、Ⅲ级钢筋作为部分预应力混凝土梁的预应力筋，将会有利于预应力混凝土的普及和发展。