

高等学校试用教材

部分预应力混凝土

Bufen Yuyingli Hunningtu

—理论、设计及专题研究—

(桥梁工程、结构工程专业用)

张士铎 编著

人民交通出版社

高等学校试用教材

部分预应力混凝土

Bufen Yuyingli Hunningtu

—理论、设计及专题研究—

(桥梁工程、结构工程专业用)

张士铎 编著

人民交通出版社

高等学校试用教材
部分预应力混凝土
—理论、设计及专题研究—
(桥梁工程、结构工程专业用)

张士铎 编著

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经销
人民交通出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 11 字数: 266 千

1990年6月 第1版

1990年6月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2000册 定价: 2.25元

内 容 提 要

部分预应力混凝土是一门新兴学科，国内外已经取得不少实践与设计经验。本书共分18章，将国内外论著和科研成果予以搜集和选编，介绍其基本概念、设计方法、专题研究和有关部分预应力混凝土的优化设计、粘结方式以及地震反应等来提高研究生理论基础及科研能力，启发他们在今后采用新技术、新材料、新工艺及新构思，为桥梁建设做出贡献。

目 录

第一章	预应力混凝土基本概念及综合介绍	1
§1-1	预应力梁受力情况	1
§1-2	用摩尔圆解释多向预加力的优越性	2
§1-3	等效荷载	3
§1-4	预应力混凝土理论的概述	4
第二章	部分预应力混凝土概述	5
§2-1	全预应力还是部分预应力	5
§2-2	部分预应力混凝土的特点	6
§2-3	混凝土结构物的分类	7
§2-4	部分预应力的抗裂性	8
§2-5	部分预应力混凝土的经济指标	10
第三章	预应力度及有关概念	12
§3-1	四类结构物理力学性能的对比	12
§3-2	预应力度的意义	12
§3-3	预应力比率	13
§3-4	预应力度的定义	13
§3-5	名义拉应力	14
§3-6	预应力度的选择	15
第四章	极限状态理论及变形协调	16
§4-1	极限状态理论的一般介绍	16
§4-2	极限状态验算项目及规定的限值	17
§4-3	公路桥梁按承载能力极限状态设计	18
§4-4	部分预应力混凝土的材料要求	19
§4-5	极限状态强度理论以及变形协调	19
§4-6	变形协调(4-14)式的解法及钢筋的应力应变曲线关系	21
第五章	部分预应力混凝土构件的弯曲性能与变形	23
§5-1	部分预应力混凝土受弯构件的工作全过程	23
§5-2	部分预应力梁截面应力变化过程	24
§5-3	部分预应力混凝土的变形	25
§5-4	应力应变轨迹图	26
第六章	部分预应力混凝土构件的设计及计算	28
§6-1	预应力比率法设计预应力与非预应力钢筋	28
§6-2	预应力度法及名义拉应力法设计部分预应力混凝土梁的力筋与非预应力钢筋	33

§6-3	部分预应力混凝土梁几种实用方法的介绍	39
第七章	迪辛格微分方程及达夫技术大学设计方法	52
§7-1	迪辛格微分方程的基本假定	52
§7-2	迪辛格微分方程的推导	53
§7-3	迪辛格微分方程中的边界条件处理	54
§7-4	利用基准力设计部分预应力混凝土梁	57
§7-5	用基准力方法计算(达夫技术大学方法)的示例	58
第八章	部分预应力混凝土梁的验算	64
§8-1	概述	64
§8-2	应力验算与计算公式的推导	64
§8-3	计算示例	67
第九章	部分预应力混凝土梁的预应力损失	71
§9-1	阿比列斯近似公式	71
§9-2	应力松弛 σ_{ss} 的计算	71
§9-3	混凝土收缩、徐变引起的预应力损失的计算	72
§9-4	关于收缩、徐变引起预应力损失 $\sigma_{ys(t)}$ 的推导	75
第十章	部分预应力混凝土梁的上拱度与挠度	77
§10-1	概述	77
§10-2	挠度的规定	77
§10-3	挠度计算的基本原则	78
§10-4	预应力引起的瞬时上拱度与徐变对上拱度的影响	80
§10-5	预加力引起的瞬时上拱度, 考虑轴向力与自重共同作用后再考虑徐变影响的计算公式	82
§10-6	短期荷载与长期荷载作用下挠度的计算	83
§10-7	部分预应力混凝土梁挠度计算方法的归纳	84
第十一章	部分预应力混凝土裂缝	87
§11-1	裂缝控制与计算综述	87
§11-2	弯曲裂缝发生的机理	89
§11-3	极限拉应变及非预应力钢筋的限制规定	92
§11-4	裂缝验算(用应力增量 $\Delta\sigma_g$ 方法)	93
§11-5	用名义拉应力方法计算裂缝宽度	95
第十二章	部分预应力混凝土预剪力、变截面剪应力及截面抗剪性能	98
§12-1	常截面简支梁在预应力作用下预剪力的计算	98
§12-2	连续梁常截面预剪力	100
§12-3	变截面部分预应力混凝土梁的剪应力计算	103
§12-4	部分预应力梁抗剪性能	108
§12-5	抗剪强度研究情况的介绍	111
第十三章	部分预应力混凝土疲劳强度	115
§13-1	概述	115
§13-2	非预应力钢筋与预应力钢筋的疲劳强度	116

§13-3	混凝土的疲劳强度	118
§13-4	部分预应力混凝土结构的疲劳问题	118
第十四章	局部应力	121
§14-1	局部应力的发生与类别	121
§14-2	剥落应力的计算	124
§14-3	按马涅耳方法计算劈裂应力	125
§14-4	最大劈裂应力试验值与理论值的对比	127
§14-5	计算示例	128
第十五章	抗扭强度	131
§15-1	结构工程遇到的受扭情况	131
§15-2	混凝土截面的抗扭性能	133
§15-3	偏心预应力与扭转力矩的共同作用	135
§15-4	弯扭耦合作用	136
§15-5	弯、扭、剪的耦合作用	137
第十六章	部分预应力混凝土梁的优化设计	139
§16-1	概 述	139
§16-2	目标函数与约束条件的建立	139
§16-3	优化方法	143
§16-4	示 例	143
第十七章	无粘结部分预应力混凝土梁的特性	147
§17-1	概 述	147
§17-2	先张法无粘结构件	147
§17-3	无粘结后张法部分预应力混凝土构件	149
§17-4	破坏阶段无粘结部分预应力后张法梁的一些初步试验数据	151
§17-5	无粘结后张法部分预应力混凝土梁国外一典型试验的介绍	152
第十八章	部分预应力混凝土结构的地震反应	154
§18-1	概 述	154
§18-2	理想化的循环荷载	154
§18-3	理想化的弯矩一曲率关系与实验值的比较	157
§18-4	理想化的荷载一位移关系	159
§18-5	非线性动力分析	159
§18-6	非线性动力分析结果	161
§18-7	小 结	166

第一章 预应力混凝土基本 概念及综合介绍

钢筋混凝土主要缺点是抗拉性能差，在工作阶段就存在裂缝。无论怎样提高混凝土标号或者更换强度较高的钢材都不能从根本上解决钢筋混凝土裂缝的开展与延伸问题。在长期生产与生活的实践中，通过广大劳动人民的智慧，发展一种新型结构称之为“预应力混凝土”。它的基本思想是：在混凝土构件中产生拉应变之前预先施加压应变，即在混凝土中产生拉应力之前就预先人为地施加压应力，用以改善全部荷载作用下构件的受力状态，推迟拉应力的出现，同时限制裂缝的形成。用上述方法改善其受力状态的结构称为“预应力混凝土结构”。

施加预应力能控制构件的裂缝、减小挠度、发挥高强材料的特性，因而使构件小而轻，恒载与活载的比值得以减小，跨径可以增大，从而扩大混凝土结构的适用范围，更经济、合理、美观、适用的为实际工程服务。

§1-1 预应力梁受力情况

首先取一素混凝土梁，在跨中承受一集中荷载 W （暂不计其自重），随着荷载 W 逐渐增加，跨中截面上出现弯曲应力，见图1-1(a)。当最大拉应力达到混凝土抗拉强度 R_t 时，梁下缘将产生裂缝，而且迅速向上延伸，构件在荷载不再增加的情况下破坏。

现在施加预应力来改善梁的受力，如在梁轴线上加轴力 N ，跨中的应力状态如图1-1(b)所示。 $\sigma_0 = \frac{N}{A_h}$ ， A_h 为混凝土截面积，显然 N 的大小是可以调节的。 $2\sigma_0$ 不超过压弯的允

许应力就可以了。但这种加力并不经济。如果将轴力 N 的作用点向下移动 $\frac{h}{6}$ ，则应力状态将如图1-1(c)。这样梁所能承受的荷载比图1-1(b)可增加一倍，但在梁端的永存应力却是不利的。这里可体会到偏心距 e 的优点。

如果改用如图1-1(d)所示的折线力筋，不仅能得到图1-1(c)中在跨中的同样的应力图式，而且支点的应力要比图1-1(c)更有利。因此在承受同一 Q 的作用下采用折线配筋（ e 值改变），得出比图1-1(b)更有利的应力图式，使沿梁长度上的压应力非常均匀，在荷载 Q 作用下梁几乎没有垂度。这是因为有上拱度的原因（在荷载作用下，构件总还是要变形的）。

所以在预应力混凝土设计中应考虑下列几点：

1. 力筋布置成折线或曲线使 e 变化。
2. 总的力筋用量最小。
3. 端部永存应力小而且均匀，这样可以避免过分应力集中而引起的水平纵向裂缝。
4. 锚头选择有利于施工，应力损失愈小愈好。
5. 尽量使预应力弯矩与外荷的一部分或全部分抵消，达到平衡荷载状态。

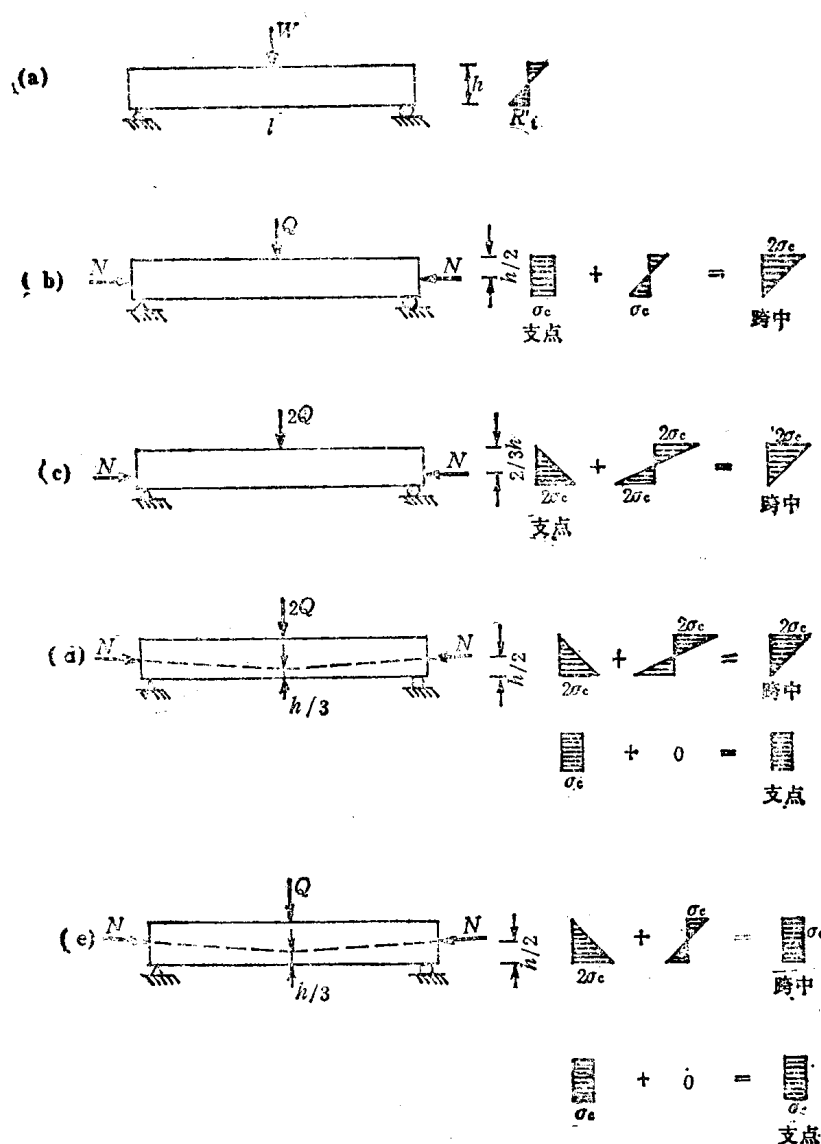


图1-1 无预应力和预应力梁的受力图

§1-2 用摩尔圆解释多向预加力的优越性

在图1-2素混凝土梁中，中和轴以下取 $ABCD$ 脱离体，它在轴向承受一拉应力 σ_x 与剪应力 τ 。利用摩尔圆绘出 σ_x 与 τ 的关系，可以看出 $\sigma_{\text{主拉}}$ 比 σ_x 要大。

如果施加纵向预应力来改善受力状态，则摩尔圆向右方显著移动， $\sigma_{\text{主拉}}$ 将减小很多，开裂危险性显而易见的得到缓和，如图1-3所示。

如果在竖向也施加预应力，例如选择在钢箍上张拉，这样给混凝土在竖向产生预应力。那么从材料力学公式中看出：

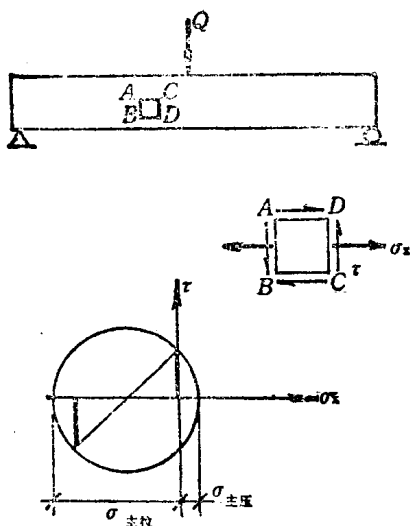


图1-2 单向拉应力与 τ 的摩尔圆图

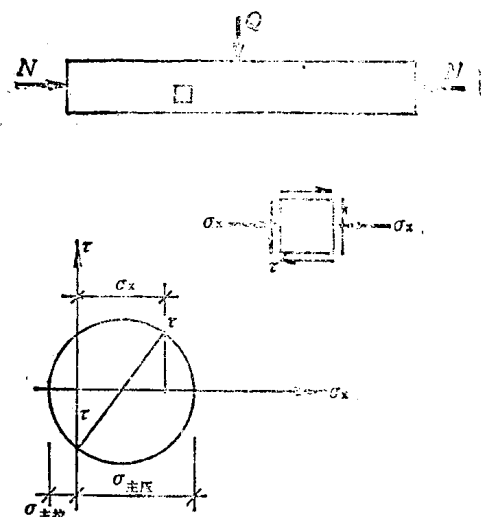


图1-3 单向压应力与 τ 的摩尔圆图

$$\sigma_{\text{主拉}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1-1)$$

当然，施加双向预应力并不意味着不产生 $\sigma_{\text{主拉}}$ ，如果令 $\sigma_{\text{主拉}} = 0$ ，则有如下关系式，即

$$\tau = \sqrt{\sigma_x \sigma_y} \quad (1-2)$$

如果横向也需要施加预应力的话，则整个自由体处于三向受压，构件的承载能力可以大幅度提高。在大跨径预应力桥梁中，例如重庆长江公路大桥的T构中，就在三向均施加预应力，目的是使结构不出现主拉应力，主拉应力产生的裂缝就不复存在。

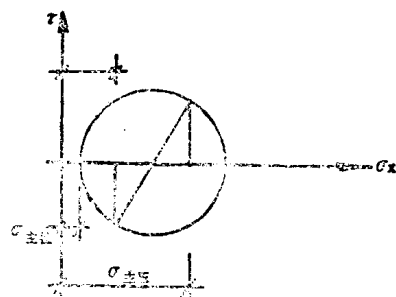


图1-4 双向预压应力与 τ 的摩尔圆图

§1-3 等效荷载

由于外荷的不同，梁中必须施预加力改善截面应力。但力筋可以是直线，例如先张法就是采用直线。也可以为有效地抵消剪力将力筋做成折线或抛物线形式。预应力筋竖向形式的改变，将会在混凝土构件上引起与构件轴线相垂直的竖向分力。这些力在梁端与梁中引起的弯矩与剪力均可视为作用于构件上的外力体系，一般称之为预反力，预弯矩等。我们把这些荷载称为等效荷载，可从下列几种情况下加以识别，如图1-5所示。

利用等效荷载时要注意方向、大小。迄今为止所考虑的情况，梁轴都是一直线，也有杆件折弯的情况（如图1-6所示）。

在此强调，上列图中所有体系均自身平衡，即预张力不产生外部反力。这对静定体系是正确的，但对超静定体系不适用。

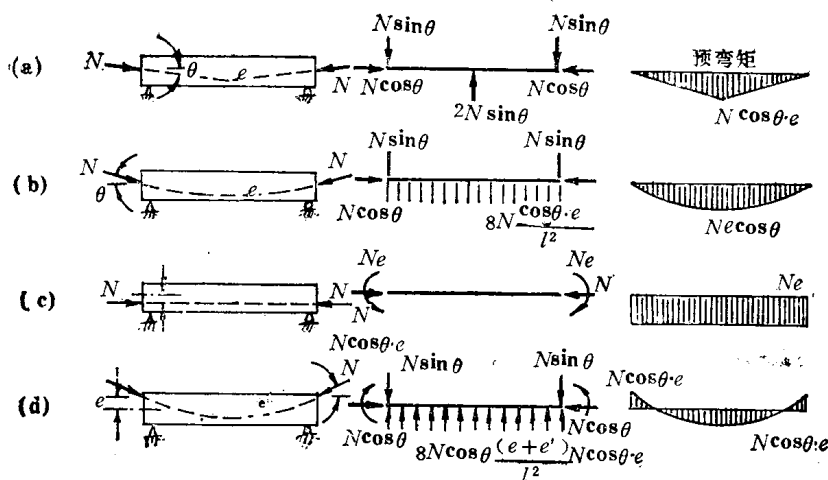


图1-5 几种等效荷载图

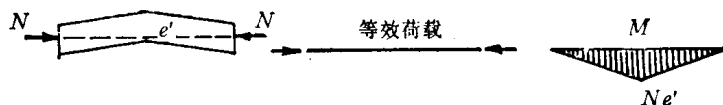


图1-6 折线构件预施应力

§1-4 预应力混凝土理论的概述

到目前为止，预应力混凝土的计算不外三种理论与概念：一、应力理论（弹性理论）；二、强度理论（极限状态理论）；三、平衡理论（林同炎理论）。

所谓应力理论，是指在设计过程中要满足各种受力阶段允许应力的要求。在预应力与自重作用下，上下边缘应力不超过 $[\sigma_s]$ ， $[\sigma_x]$ 。或者在预应力、自重、恒载以及活载作用下，在截面的上下边缘不超过 $[\sigma'_s]$ 与 $[\sigma'_x]$ 。

所谓强度理论，是指在极限状态下各截面要满足极限承载力的要求，即结构要具备一定的可靠度。

平衡理论是指在预应力作用下，例如力筋为抛物线型，相当于有一向上的均布荷载。由于预应力产生的向上均布荷载与自重，恒重与活载部分平衡。没有平衡的荷载，可按素混凝土梁计算其应力与挠度。详细的讨论见本章参考文献〔2〕。

本章参考文献

- 〔1〕（美）H.R.尼尔森著《预应力混凝土设计》。
- 〔2〕 Lin, T.Y. *Load-Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures*, A.C.I. June 1963. PP719~741.

第二章 部分预应力混凝土概述

部分预应力混凝土的出现是工程实践的结果。早在1939年奥地利工程师F.安波哥(Fritz Emperger)就采用了部分预应力来代替全预应力。随后英国P.W.阿比列斯(P.W.Abeles)从1945年到1967年发表了一系列的论著,从理论上、材料上、经济上和工艺上对部分预应力做了详细的论证与分析。本章将对部分预应力混凝土的发展、特点、分类、抗震性及经济指标加以阐述,目的在于了解它的必要性与优越性。

§2-1 全预应力还是部分预应力

自从1928年法国工程师E.弗莱西奈(E.Freyssinet)用高强度钢丝建成预应力混凝土结构之后,预应力混凝土迅速发展,从钢筋混凝土到预应力混凝土是一个巨大的飞跃。

在预应力混凝土发展初期,一般都规定在运营阶段混凝土不允许出现拉应力,即所谓全预应力,以保证结构有足够的抗裂度。在全预应力问题上英国和法国具有不同的观点。英国在P.W.阿比列斯的倡议下从经济效益出发,估计最不利的设计荷载仅会偶然出现,故经常储备那么大的预压应力毫无必要。可以用一些非预应力钢筋(高强钢丝或普通软钢)来满足极限承载力的要求,同时有效地防止裂缝的开展与增加结构的延性性能。法国的观点不同,在法国建筑规范中不但不允许采用部分预应力,而且在截面的受拉区还要永远保持一定的压应力,一般规定为 $0.08R$ (R 表示 $20 \times 20 \times 20\text{cm}$ 立方体强度)用以防止钢筋的锈蚀和增大结构的安全度,实质上这种做法称为超预应力。很明显,在设计规范中做如此硬性的规定不利于各学派的自由讨论与交流。超预应力、全预应力、有限预应力或部分预应力要根据不同的材料供应,客观条件、结构的使用要求、经济条件并结合当地施工情况从经济、合理、安全、适用角度出发进行选用,不应硬性规定统一为一种形式的结构。例如,在桥梁上,中小跨径宜用部分预应力因为活载的比重大。而在大跨径的桥梁就应该采用全预应力,因为活载占的比值相对恒载而言要小得多。另外在房屋建筑上,空心楼板宜用部分预应力,因为它的反拱度要比全预应力小,这样有利于结构上的处理。在铁路上,把全预应力的轨枕改成部分预应力更能适应轨枕的受力要求。在圆形蓄水池中或许应该坚持全预应力或超预应力,使之不出现拉应力或裂缝。在工程实践中,应该特别强调因地制宜,但是要结合我国具体情况。任何技术上、思想上的偏见均会造成严重的政治上与经济上的损失,这种工程实例不胜枚举。

随着预应力混凝土在国内外广泛应用,人们的认识进一步深化。从经济、安全、材料、施工四个方面综合考虑,随之就出现了在最大设计荷载作用下,允许有拉应力产生的所谓有限预应力。进而又出现了在经常荷载与最大设计荷载作用下均允许出现拉应力,而在最大设计荷载作用下还允许出现裂缝的部分预应力。在日本,甚至于在普通钢筋混凝土的基础上施加少量预应力,例如为全预应力的20%~30%,用以限制裂缝宽度的措施,即所谓预应力一钢筋混凝土的设计思想。严格说来,从普通钢筋混凝土到超预应力混凝土之间要经过预应力一钢筋混凝土、部分预应力、有限预应力及全预应力四个阶段。

目前，无论房屋建筑或桥梁工程上全预应力混凝土还占着主导地位，只有打破这种思想的束缚才能推广部分预应力。现在只有少数几个国家允许在规范中使用部分预应力。我国1985年公路桥涵设计规范已列入部分预应力混凝土的有关条款，其余国家还没有把部分预应力混凝土结构合法化，理由有：

- 1. 尚无完美的设计方法；
- 2. 在使用荷载下预应力结构的裂缝理论还在讨论中；
- 3. 试验的探索还不充分。

然而，由于过去材料性能差、预应力损失大，在设计荷载作用下就出现了拉应力，这不能说我们已经做过有限预应力，因为我们从来没有设计过有限或部分预应力混凝土。以前迷信法国规范，要在梁的下翼缘保持一定的压应力。这种超预应力既不经济，又不安全，往往造成横向拉应变超出极限拉应变，因之出现不少纵向不能恢复的水平裂缝。在铁路桥梁上就出现过这种纵向水平裂缝，正说明施加的预应力过大，不仅锚头多、花费大、耗资巨，而且还引起了不良的后果。采用部分预应力不单纯从经济出发，同时对结构的抗震也有利。现在发展部分预应力在我国桥梁界尚有不少阻力。

- 1. 高强材料的单价与低强钢筋的差价过大，不能大幅度节约钢材；
- 2. 规范中可靠度规定对部分预应力不适用尚需要调整；
- 3. 对部分预应力的认识不足，保守思想尚需克服。任何习惯势力都需要较长的一段时间才能扭转。可以预言部分预应力发展指日可待。

§2-2 部分预应力混凝土的特点

预应力混凝土与钢筋混凝土比较，它的主要优点在于提高结构的抗裂性，使用高强材料从而节约用钢量。预应力混凝土构件截面尺寸比钢筋混凝土构件小，耐久性良好，自重也轻，因而提高了跨越能力。

- 事物的发展总是一分为二的，采用全预应力或超预应力混凝土结构也存在下列缺点：
- 1. 虽然采用高强钢材，节约总的用钢量，但是高强钢材单价高，有时供应出现短缺。
 - 2. 在营运阶段不允许出现裂缝或者保存一定的压应力，则需要加大预应力。过大的预应力不仅设备上要增加开支，而且可能产生水平裂缝。我国铁路上过去建造的预应力混凝土梁桥中出现过这类裂缝，裂缝宽度平均在0.1mm左右。
 - 3. 结构长期处于高压应力状态下并不安全，特别是混凝土的徐变继续增加将使预应力构件处于不稳定的状态。

- 4. 增大材料消耗有时造成浪费。
- 采用部分预应力，受力情况会得到改善，如果不计上拱度，都从加载开始测定结构的挠度则如图2-1所示。

假定混凝土的弯曲抗拉强度为

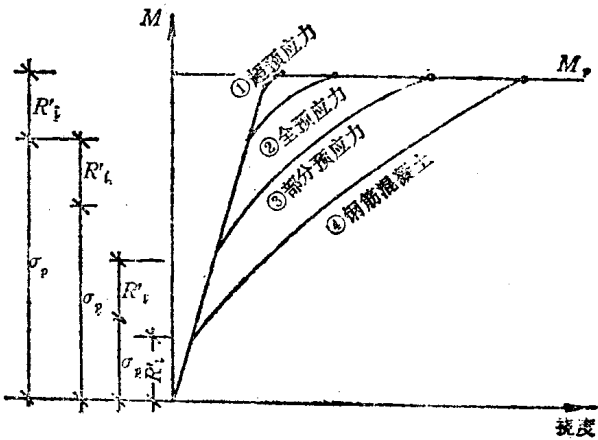


图2-1 预应力混凝土荷载挠度曲线

R'_t ，从结构的荷载与挠度曲线上看，它们的极限承载力均相同，但挠度的最终值随着预应力的减小而增加。

超应力的刚度 (EI) 最大，全预应力次之，部分预应力又次之，钢筋混凝土最小。如果用 σ_p 来衡量预应力的大小，超预应力最大，全预应力次之，部分预应力又次之，钢筋混凝土无预加应力。只要在 $\sigma_p + R'_t$ 下结构不出现裂缝或者偶然出现一些可以闭合的裂缝，结构在运营阶段就会完好无缺，部分预应力混凝土恰可满足这一要求，这就表现出部分预应力混凝土的优越性。因此采用部分预应力混凝土有下列优点：

1. 在承载力相同的条件下，部分预应力可节约高强钢材。例如跨径48m，梁高2.8m，翼缘宽175cm的T型梁，自重+恒重 $q = 0.208 \text{ tf/m}$ ，活载 $p = 2.9 \text{ tf/m}$ ，如按 $0.35p$ 时混凝土下边缘共压计算。全预应力梁需要16束12 ϕ 7，而部分预应力只需要11束，大约可节省31.3%高强钢材。

2. 如前所述，超预应力容易使混凝土产生水平裂缝，这些水平裂缝比竖直裂缝更危险。因为这类裂缝卸载后不闭合而且迎水面大，更容易使水份侵蚀而腐蚀钢材。采用部分预应力可避免水平裂缝的出现。

3. 降低预应力，使构件超张拉事故减少，充分改善混凝土徐变使结构产生的不稳定状态。

4. 广开材源，即使极限强度低的钢材也可用来施加预应力。给一些过去认为不宜施加预应力的钢材开辟应用之路。特别是边远地区更宜采用部分预应力混凝土代替全预应力。

5. 部分预应力混凝土梁可以减少持续压力引起的徐变上拱度。

6. 由于部分预应力混凝土结构中配置相当数量的低强度的普通钢材，因此它不仅能安全地承受静载及疲劳荷载，而且结构的延性好，能够更有效地抵抗地震荷载，避免出现结构物的脆性破坏。

7. 由于施加的预应力小，便于结构的施工与安装。

§2-3 混凝土结构物的分类

国际预应力混凝土协会 (FIP) 及欧洲混凝土委员会 (CEB) 在1970年第六届会议上建议将混凝土结构物分为4级，即

I级——全预应力：在使用荷载最不利组合下，不允许混凝土出现拉应力。

II级——有限预应力：在全部荷载作用下，允许有低于混凝土抗拉强度的拉应力，但在工作阶段应该避免出现拉应力。

III级——部分预应力：对拉应力没有限制，但必须控制裂缝宽度。

IV级——钢筋混凝土。

但是日本为了扩大钢筋混凝土的应用范围，采用在钢筋混凝土构件中施加少量预应力来改善裂缝的开展，称之为“预应力—钢筋混凝土”，实际上这是一种加固方案，由于日本在若干座桥梁上普遍使用这种结构已经成为事实。

有限预应力与部分预应力是有区别的。事实上，有限预应力与全预应力在工作阶段均无裂缝出现，可能称为全预应力。在美国是这样理解的，故在他们的规范中不再用有限预应力这个名称。

部分预应力（有人称谓弱筋—预应力混凝土），它容许在经常和全部运营荷载作用下都

混凝土结构的分类

表2-1

名 称	FIP-CEB 分 类	预加力	拉 应 力		开 裂	
			经常荷载	最大设计荷载	经常荷载	最大设计荷载
1.全预应力混凝土	I	有	无	无	无	无
2.有限预应力混凝土	II	有	无	有	无	无
3.部分预应力混凝土	III	有	有	有	无	有
4.预应力-钢筋混凝土	*	有	有	有	可有	有
5.钢筋混凝土	IV	无	有	有	有	有

* FIP-CEB 中没有这一类，日本用过。

出现拉应力，但在经常运营荷载作用下不出现裂缝，全部运营荷载（即最大设计荷载）下可能出现裂缝。设计中以预应力力筋为主，它与非预应力钢筋一起保证强度与抗裂度，当然裂缝开展的大小要受到严格控制。

§2-4 部分预应力的抗裂性

目前，我国公路预应力混凝土规范草案已将抗裂性验算取消，但在工作阶段验算中加以考虑。虽然抗裂度的规定值得商榷，但全部摒弃抗裂性，对部分预应力混凝土是不妥当的，这里仍然可以讨论抗裂度的概念。

在全预应力混凝土中，按裂缝极限状态进行抗裂性验算：

$$[\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p]K_f \leq \sigma_h + \gamma R'_t \tag{2-1}$$

或

$$\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p - \frac{\gamma R'_t}{K_f} \leq \frac{\sigma_h}{K_f} \tag{2-1A}$$

按允许应力法验算运营阶段正应力时要求：

$$\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p - \sigma_h \leq 0 \tag{2-2}$$

在上列三式中：

- σ_g = 恒载作用下梁的下边缘出现的拉应力。
- σ_p = 活载作用下梁的下边缘出现的拉应力。
- σ_h = 永久预加力（扣除全部预应力损失）产生的压应力。
- R'_t = 混凝土的抗拉强度。
- μ = 冲击系数。
- γ = 塑性指数，与截面形式以及梁的高度有关。
- K_f = 抗裂安全系数。

对有限预应力，其抗裂性的验算公式，参考 FIP-CEB 的规定，取如下形式：

$$\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p - \sigma_h \leq \frac{\gamma R'_t}{K_f} \tag{2-3}$$

$$\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p - \frac{\gamma R'_t}{K_f} \leq \sigma_h \tag{2-3A}$$

