



先张部分预应力砼板应用研究

主编 卢 军 王今朝
主审 李树彬

XIANZHANG BUFEN
YUYINGLI TONGBAN
YINGYONG YANJIU

东北林业大学出版社

先张部分预应力砼板 应用研究

主编 卢 军 王今朝
主审 李树彬

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

先张部分预应力砼板应用研究/卢军, 王今朝主编. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2006.7

ISBN 7-81076-914-6

I. 先… II. ①卢… ②王… III. 桥梁工程—混凝土结构—先张法预加应力—研究 IV. U 445.57

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 083981 号

责任编辑: 朱成秋

封面设计: 彭 宇



NEFUP

先张部分预应力砼板应用研究

Xianzhang Bufen Yuyingli Tongban Yingyong Yanjiu

主编 卢 军 王今朝

主审 李树彬

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨市工大节能印刷厂印装

开本 787×960 1/16 印张 11.5 字数 210 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81076-914-6

TU·35 定价: 20.00 元

前 言

我国高速公路及城市立交高架桥体系桥梁建设研究的结果表明,中小跨径桥梁建设投资占桥梁工程总投资的50%以上,该部分结构的技术经济指标先进与否将直接影响到整个工程项目的投资规模和项目收益,因此对中小跨径桥梁结构的技术经济指标进行深入细致地研究,对降低工程造价、提高项目收益率、推进桥梁建设项目管理、设计施工标准化水平具有十分重要的意义。

本书在吸收国内外对部分预应力技术在桥梁设计中应用、研究成果的基础上,结合结构优化基本原理,提出了将部分预应力计算理论与工程结构优化分析理论相结合,在结构设计中应用结构优化设计理论,在满足结构构件各受力阶段强度、刚度等工程设计、施工规范要求的边界约束条件下,以单片梁总造价为目标函数,通过求解多元非线性方程组,进而得到理论结构优化计算结果,并通过原型试验对优化设计结果进行验证和修正,得到中小跨径桥梁结构技术经济指标最终优化的设计结果。

通过与类似常规中小跨径桥梁结构技术经济指标的综合分析比较发现,同等跨径先张法部分预应力混凝土空心板梁结构较之后张法全预应力混凝土空心板梁等常规中小跨径桥跨上部结构具有技术指标先进、可节约投资33.8%的特性;经过综合评价,先张法部分预应力混凝土空心板梁是高速公路、城市立交高架桥体系中小跨径桥跨上部结构大批量应用首选结构形式,是桥梁设计、建造标准化的发展方向。

本书提出的应用工程结构优化设计理论于桥梁结构设计过程,具有一定的实用意义,对提高桥梁建设水平、降低工程投资有一定的参考价值,为以后对钢筋混凝土板梁、预应力混凝土板梁结构优化设计的更加深入细致的研究奠定了一定的基础。

编者

2006年4月

目 录

1 部分预应力概述	(1)
1.1 部分预应力的起源.....	(1)
1.2 部分预应力混凝土的特点.....	(2)
1.3 混凝土结构的分类.....	(3)
1.4 部分预应力的抗裂性.....	(4)
2 有关部分预应力的基本概念	(7)
2.1 预应力度.....	(7)
2.2 预应力度意义.....	(8)
2.3 名义拉应力.....	(8)
2.4 预应力比率.....	(9)
2.5 预应力度选择.....	(9)
3 部分预应力结构的极限状态变形协调	(11)
3.1 极限状态强度理论及变形协调.....	(11)
3.2 变形协调式的解法及钢筋的应力应变曲线关系.....	(13)
4 部分预应力混凝土构件的弯曲特性与变形	(15)
4.1 部分预应力混凝土受弯构件的工作过程.....	(15)
4.2 部分预应力混凝土的挠度变形.....	(16)
4.3 部分预应力混凝土的应力与裂缝.....	(17)
5 部分预应力混凝土构件的设计及其计算	(19)
5.1 预应力比率法设计预应力与非预应力钢筋.....	(19)
5.2 预应力度法及名义拉应力法设计部分预应力混凝土梁.....	(24)
5.3 部分预应力混凝土梁几种实用方法的介绍.....	(28)
6 部分预应力混凝土梁的验算	(34)
6.1 概 述.....	(34)
6.2 应力验算与计算公式的推导.....	(34)
7 部分预应力混凝土梁的预应力损失	(38)
7.1 阿比列斯近似公式.....	(38)
7.2 应力松弛 σ_{s5} 的计算.....	(39)
7.3 混凝土收缩、徐变引起的预应力损失的计算.....	(39)

8 部分预应力混凝土梁的反拱与挠度	(41)
8.1 概 述	(41)
8.2 挠度的规定	(41)
8.3 挠度计算的基本原则	(42)
8.4 预应力引起的瞬时反拱与徐变对反拱的影响	(44)
8.5 预应力引起的瞬时反拱, 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	(44)
8.6 短期荷载与长期荷载作用下挠度的计算	(46)
8.7 部分预应力混凝土梁挠度计算方法的归纳	(46)
9 部分预应力混凝土裂缝	(49)
9.1 裂缝控制与计算	(49)
9.2 裂缝验算 (用应力增量 $\Delta\sigma_g$ 方法)	(52)
9.3 用名义拉应力方法计算裂缝宽度	(55)
10 部分预应力混凝土抗剪性能	(57)
10.1 常截面简支梁在预应力作用下预剪力的计算	(57)
10.2 连续梁常截面预剪力	(58)
10.3 变截面部分预应力混凝土梁的剪应力计算	(61)
10.4 部分预应力梁抗剪性能	(66)
11 结构优化设计基本理论	(68)
11.1 结构优化设计基本概念	(69)
11.2 准则方法	(77)
11.3 无约束极值问题	(84)
11.4 一维无约束极值	(94)
11.5 线性规划问题	(99)
11.6 几何规划	(110)
11.7 动态规划	(116)
11.8 结构拓扑优化设计	(119)
11.9 结构模糊优化设计	(123)
12 部分预应力混凝土梁结构优化设计	(128)
12.1 主要控制技术经济指标	(128)
12.2 先张部分预应力混凝土空心板梁结构优化设计参数的 设立	(129)
12.3 先张部分预应力板梁总造价多元线性函数的建立	(130)
12.4 先张部分预应力混凝土空心板梁优化设计约束条件	(131)

12.5	先张部分预应力混凝土空心板梁优化设计约束函数的建立	(135)
12.6	先张部分预应力板梁优化设计数学模型建立及求解	(137)
12.7	先张部分预应力混凝土板梁结构优化设计计算结果	(157)
12.8	本章小节	(158)
13	先张部分预应力混凝土空心板梁试验验证	(159)
13.1	试验加载方法及仪器布设	(159)
13.2	检测方法	(159)
13.3	检测结果	(160)
13.4	优化结果的技术指标分析	(164)
13.5	优化结果的经济指标比较	(167)
14	结 论	(171)
	参考文献	(172)

1 部分预应力概述

本章将对部分预应力混凝土的发展、特点、分类加以阐述，目的在于了解它的优越性。

1.1 部分预应力的起源

自从法国人 E. Freyssinet (E·弗莱西奈) 于 1928 年用高强度钢丝建成预应力混凝土结构之后，建筑结构从钢筋混凝土到预应力混凝土产生了一个质的飞跃。

在预应力混凝土发展初期，在预应力问题上有两种截然相反的观点。

法国人在预应力技术创始人 E. Freyssinet 的影响下，其建筑规范严格要求在截面的受拉区还要永远保持一定的压应力，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。

1939 年奥地利工程师 Fritz Emperger 提出了部分预应力代替全预应力的设想，并在随后的工程实践中进行了应用，取得了较好的效果。随后英国人 P. W. Ablesz 对部分预应力混凝土结构从计算理论、建筑材料、工程技术经济指标和施工技术等方面进行了详细的分析与论证，为部分预应力技术的应用推广扫清了障碍。

英国人从经济效益出发，应用部分预应力理论，以最不利的设计荷载出现概率统计研究为基础，认为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，现在我们称之为部分预应力。

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。

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客观条件、结构条件、材料供给等条件，并结合使用要求、经济条件、施工情况，从经济、合理、安全、适用的角度出发进行比较和选择，而不应硬性规定统一的结构标准。

例如：在桥梁上，中小跨径的桥梁结构宜用部分预应力结构形式（因为活载占的比重大），而在大跨径的桥梁结构就应采用全预应力结构形式（因

活载占的比重小很多)。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。任何技术上、思想上的偏见均会造成严重的政治、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的广泛应用,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,例如施加全预应力的20%~30%的预应力,用以限制裂缝宽度,即所谓预应力—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混凝土、部分预应力混凝土、有限预应力混凝土及全预应力混凝土四个阶段。

目前,无论是在房屋建筑上还是在桥梁工程上,全预应力混凝土均占有主导地位,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。

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,这不能说我们早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,因此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。

1.2 部分预应力混凝土的特点

预应力混凝土结构由于其自身的主要优点,如提高结构的抗裂性能,使用高强材料从而节省结构用钢量,混凝土构件截面尺寸小、耐久性好、自重轻等,因而提高了结构的跨越能力,较之普通钢筋混凝土结构具有较高性能价格比,所以得到了广泛推广和应用。

但是随着预应力混凝土结构物的广泛应用及大量工程实例的积累,人们

逐渐发现了预应力混凝土结构在应用中存在的缺欠,进而提出了新的、更高的要求:

(1) 虽然采用高强钢材,节约了总的用钢量,但是高强钢材单价高。

(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 0.1 mm 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。

对于混凝土结构刚度而言,超预应力混凝土结构最大,全预应力混凝土结构次之,部分预应力混凝土结构又次之,钢筋混凝土结构最小。比较三种预应力结构有效预应力值,超预应力结构最大,全预应力结构次之,部分预应力结构又次之,钢筋混凝土结构无预应力。更为重要的是,结构在运营阶段不出现裂缝或者偶然出现一些可以闭合的裂缝,这种特性是部分预应力混凝土结构所独具的:

(1) 承载力相同的条件下,部分预应力可节约高强钢材。以跨径 48 m、相同荷载条件下全预应力梁、部分预应力梁消耗高强钢材指标比较表明,部分预应力梁较之前者大约可节省 31.3% 的高强钢材。

(2) 施加的预应力小,便于结构的施工。

(3) 部分预应力混凝土梁可以减少持续压力引起的徐变反拱。

(4) 拓展了预应力混凝土结构应用的地域限制,给一些过去认为不宜施加预应力的钢材开辟应用之路,特别是高强钢材短缺地区更宜采用部分预应力混凝土代替全预应力。

(5) 降低预应力,充分改善混凝土徐变使结构产生的不稳定状态。

(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) 采用部分预应力可避免水平裂缝的出现。

1.3 混凝土结构的分类

国际上普遍认同的混凝土结构的分类标准如下:

I 类——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类——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，在工作阶段应该避免出现拉应力。

Ⅲ类——部分预应力：对拉应力没有限制，但必须控制裂缝宽度。

Ⅳ类——钢筋混凝土。

美国是这样理解的：有限预应力与全预应力在工作阶段均无裂缝出现，可称为全预应力，故在他们的规范中不采用“有限预应力”这个名词。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的办法，称之为“预应力—钢筋混凝土”，实际上这是一种加固方案，日本在若干座桥梁上已经普遍使用这种结构。

部分预应力，容许在经常和全部运营荷载作用下都出现拉应力，但在经常运营荷载作用下不出现裂缝，最大设计荷载下可能出现裂缝。设计中以预应力钢筋为主，它与非预应力钢筋一起保证强度与抗裂性能，当然裂缝开展的大小也要受到严格控制。

1.4 部分预应力的抗裂性

在全预应力混凝土中，按裂缝极限状态进行抗裂性验算：

$$[\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p]K_f \leq \sigma_k + \gamma R'_l \quad (1.1)$$

按允许应力法验算运营阶段正应力时要求：

$$\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p - \sigma_k \leq 0 \quad (1.2)$$

在上列二式中：

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_k ——永久预应力（扣除全部预应力损失）产生的压应力。

R'_l ——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。

对于有限预应力，其抗裂性的验算公式取如下形式：

$$\sigma_g + (1 + \mu)\sigma_p \leq \frac{\gamma R'_l}{K_f} \quad (1.3)$$

为了保证混凝土受拉区抗拉能力的发挥，避免早期出现的裂缝发展过

宽, 可以配置少量的非预应力螺纹钢筋, 其配筋的截面积应满足下列条件:

$$0.6R_g A_g \geq \frac{1}{2} T \quad (1.4)$$

式中: A_g ——非预应力钢筋的截面积;

R_g ——钢筋的极限强度, $0.6R_g$ 相当于钢筋的屈服强度;

T ——混凝土受拉区的全部拉力。

一般希望在经常荷载作用下可出现拉应力, 但没有裂缝出现。部分预应力混凝土结构就是以这种状态为依据的。按 Fritz Leonhart 的建议, 经常荷载是指在结构预期使用年限中出现次数大于 100 万次的荷载, 一般取静载加上一部分活载, 若将这部分活载与全部活载之比记为 β (可根据具体情况选择), 则按允许应力法设计时, 得下列公式:

$$\sigma_h - (1 + \mu)\beta\sigma_p - \sigma_s \geq 0 \quad (1.5)$$

式中: σ_h ——混凝土的抗拉强度;

σ_p ——活载产生结构下缘拉应力;

σ_s ——预应力前混凝土收缩受到非预应力钢筋的弹性约束而在混凝土内产生的拉应力。

为了防止 σ_s 造成混凝土早期开裂, 可以在混凝土结硬初期先施加一部分预应力。

根据平面变形的协调条件, 先求出内力, 然后得到 σ_s 。

$$\sigma_s = \Delta N_s \left(\frac{1}{A_h} + \frac{e_g y}{I_h} \right) \quad (1.6)$$

式中: A_h ——混凝土截面面积;

I_h ——混凝土截面惯性矩;

e_g ——非预应力钢筋偏心距;

ΔN_s ——由于混凝土收缩应变在非预应力钢筋中产生的压力。

对部分预应力混凝土结构除按式 (1.5) 验算混凝土应力外, 还需验算非预应力钢筋中的应力、预应力钢束中的附加应力以及在全部荷载下的裂缝宽度。

裂缝宽度可按 Y. Guyon 最小有效配筋率大于等于 2% 以及按下式限制最大非预应力钢筋直径 Φ :

$$\Phi \leq \frac{K_1 K_2 \rho}{(10 + \rho) \Delta \sigma_g} \quad (1.7)$$

式中: ρ ——系数, $\rho = \frac{A_g}{A_h}$;

A_g ——非预应力钢筋的截面积；

A_h^0 ——开裂混凝土净面积；

K_1 ——根据抗裂重要性确定，构件裂缝控制标准高取 $\Delta\sigma = 5\,000$ ，一般结构取 $10\,000$ ，无关紧要的结构取 $15\,000$ ；

K_2 ——对软钢取 1，对螺纹钢取 1.6。

日本常用钢筋混凝土—预应力结构以钢筋混凝土为主，预加应力的目的只是单纯减少裂缝的出现，可按极限状态来表达抗裂安全度的具体规定：

$$\frac{M_{w1}}{M_g} \geq K_{fg} \quad (1.8)$$

$$\frac{M_{w1} - M_g}{M_p} \geq K_{fp} \quad (1.9)$$

式中： M_{w1} ——裂缝宽度为 w_1 时的截面上的弯矩；

M_{w2} ——裂缝宽度为 w_2 时的截面上的弯矩；

M_g 、 M_p ——静、活载弯矩；

K_{fg} 、 K_{fp} ——静、活载抗裂安全系数；

w_1 ——当恒载弯矩乘以 K_{fg} 抗裂安全系数时引起截面的裂缝宽度；

w_2 ——当恒载弯矩加上活载弯矩再乘以抗裂安全系数 K_{fp} 时引起截面的裂缝宽度。

2 有关部分预应力的基本概念

本章将介绍各类有关预应力度度的定义，以了解它的物理意义及其在部分预应力混凝土中的应用。

2.1 预应力度

预应力度 (Degree of Prestress) 的概念是由印度学者 C. S. Ramaswamy 提出的，

$$DP = \frac{M_0}{M_D + M_L} \quad (2.1)$$

式中：DP——预应力度；

M_0 ——减压弯矩或称“失压弯矩”，也称“退压弯矩”；

M_D ——恒载弯矩；

M_L ——活载弯矩。

减压弯矩 M_0 是在有效预应力作用下使混凝土截面预压区最外纤维应力（或应变）为零的虚拟的外加弯矩，可用下式计算：

$$M_0 = N_y e + N_y e_{\perp} = N_y e + \frac{N_y I_h}{A_y y_s} \quad (2.2)$$

式中： N_y ——有效预应力；

e ——预应力钢筋到混凝土截面形心轴的偏心距；

y_s ——混凝土截面的预压区最外纤维到该截面重心轴的距离；

A_y ——预应力钢筋的截面积；

I_h ——混凝土截面的惯性矩；

$e_{\perp}$ ——混凝土形心轴到截面上核心的距离。

减压弯矩或称“无拉应力界限弯矩”，即在 M_0 作用下，截面最外缘一点的预压应力处于消减或丧失的状态，但对整个截面而言，压应力并不消失，也不是处于压应力递减状态，而仅是处于虚构的无拉应力的临界状态。当实际作用的弯矩 $M \leq M_0$ 时，对于未开裂的截面，结构是处于无拉应力的“全预应力状态”；对于已开裂的截面，裂缝可处于闭合状态。而当 $M > M_0$

时, 截面出现拉应力, 对于已经开裂的截面, 裂缝处于非闭合状态。

选择预应力度, 就是确立减压弯矩 $M_0 = DP (M_D + M_L)$ 这一临界值在整个荷载弯矩谱中的位置, 也就是确立在该弯矩连续谱中构件处于全预应力状态的度, 或者是构件接近于全预应力的度。

对于公路桥梁, 一般要求 $DP = \frac{M_0}{M_D + M_L} = \frac{M_D}{M_D + M_L}$, 即 $M_0 = M_D$ 。这样预应力度就等于恒载弯矩与恒载弯矩加活载弯矩的比值, 现在看起来这个条件也存在问题。

2.2 预应力度度的意义

在截面设计中, 部分预应力混凝土与普通钢筋混凝土或全预应力混凝土结构不同之处在于: 必须同时考虑预应力钢筋和非预应力钢筋的配置。当截面外部轮廓尺寸确定之后, 由截面上内力与外力平衡可以得到两个方程, 即 $\sum X = 0$ 和 $\sum M = 0$ 。根据两个方程确定三个未知量, 当然造成了部分预应力混凝土结构设计上的不定性、随意性与复杂性, 同时也给部分预应力混凝土结构的截面设计提供了一个自由度, 使之根据结构的具体要求补充一个选择条件。

补充条件的选取可以从不同角度和不同的方法出发。对预应力钢筋和非预应力钢筋用量的推算一般可采用几种方法, 例如预应力比率法、预应力度法、名义拉应力法、最佳预应力区间法和控制开裂法等。其中预应力度的概念在部分预应力混凝土截面设计中占有重要地位。

2.3 名义拉应力

名义拉应力这个概念是由英国学者 P.W. Ablesz 提出的, 后经 Steveu、Beeby、Taylor 等人使用并加以推广, 现在已被英国桥梁规范 BS5400 采纳。名义拉应力是当混凝土已开裂时, 仍假定混凝土未开裂, 而以均质截面所计算得出的截面最大的假想拉应力。

名义拉应力法进行部分预应力混凝土梁的设计, 就是将弯曲裂缝宽度近似地看做是混凝土名义拉应力的单因子函数, 使构件的允许弯曲裂缝宽度与通过实验得出的综合性的混凝土允许名义拉应力相对应, 用此来建立允许弯曲裂缝宽度值与预应力的关系。

当截面受拉区的混凝土中设有非预应力钢筋, 修正后的允许名义拉应力还

可以提高。其增量按非预应力钢筋截面面积与混凝土截面面积的百分比计算,但在任何情况下,提高后的允许名义拉应力不得超过混凝土设计标号的 1/4。

2.4 预应力比率

预应力比率这个概念是由美国学者 A. E. Naaman 教授首先引入的,一般用 λ_p 表示 (英文原文为 Partial Prestress Ratio, 简称为 PPR), 其定义为: 在极限状态下, 只有预应力钢筋存在时所提供的极限抵抗弯矩与预应力钢筋加上非预应力钢筋共同提供的极限抵抗弯矩的比值, 即

$$\lambda_p = \frac{[M_u]_y}{[M_u]_{y+g}} = \frac{A_y R_y (h_y - \frac{x}{2})}{A_y R_y (h_y - \frac{x}{2}) + A_g R_g (h_g - \frac{x}{2})} \quad (2.3)$$

式中: $[M_u]_y$ ——预应力钢筋承受的极限弯矩;

$[M_u]_{y+g}$ ——预应力钢筋和非预应力钢筋共同承受的极限弯矩;

h_y 、 h_g ——分别为预应力钢筋和非预应力钢筋的截面重心到混凝土顶面的距离;

A_y 、 A_g ——分别为预应力钢筋和非预应力钢筋的截面积;

R_y 、 R_g ——分别为预应力钢筋和非预应力钢筋的极限强度;

x ——截面上受压混凝土矩形应力区的高度。

如果 $h_y = h_g$, 则 (2.3) 式可以简化为

$$\lambda_p = \frac{[M_u]_y}{[M_u]_{y+g}} = \frac{A_y R_y}{A_y R_y + A_g R_g} \quad (2.4)$$

因此, 预应力比率又可以近似地定义为: 预应力钢筋的极限拉应力与截面总的极限拉力的比率。该定义与瑞士 Thulimann 教授建议的预应力指标 (Partiat Prestress Index) 相仿。

$$i_p = \frac{A_y \sigma_{y0.2}}{A_y \sigma_{y0.2} + A_g \sigma_g} \quad (2.5)$$

式中: i_p ——预应力指标 (PPI);

$\sigma_{y0.2}$ ——预应力钢筋残余变形为 0.2% 时的条件屈服强度;

σ_g ——非预应力钢筋的屈服强度。

2.5 预应力度的选择

部分预应力混凝土显著优点之一就是可以比较自由地选择预应力度, 但

这往往会给工程师带来一些困惑，如何合理地选取预应力度呢？

根据瑞士部分预应力混凝土规范 SIA - Norm No. 162 (1968 年) 规定，要求在恒载作用下截面上不出现拉应力，即

$$DP = \frac{M_0}{M_D + M_L}$$

这条规定似乎过严，特别是在活载占全部荷载的比重比较小的情况下，这条规定限制了结构工程师选择预应力度范围。合理选择 DP 值是很重要的。建议目前如无可靠说服力，在公路桥梁上一般宜用 0.6 ~ 0.7，而对于中、小跨度的铁路桥梁可能以 0.8 ~ 0.9 更为适宜。这要根据截面的形状与梁的高度来确定。