



“十一五”高等学校通用教材（土木建筑类）

预应力混凝土结构

YUYINGLI HUNNINGTU JIEGOU

● 程东辉 薛志成 编著



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



“十一五”高等学校通用教材（土木建筑类）

YUYINGLI HUNNINGTU JIEGOU

预应力混凝土结构

程东辉 薛志成 编著



中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

预应力混凝土结构/程东辉, 薛志成编著. —北京: 中国计量出版社, 2009. 11

“十一五”高等学校通用教材 (土木建筑类)

ISBN 978-7-5026-3211-3

I. ①预… II. ①程… ②薛… III. ①预应力混凝土结构—结构设计—高等学校—教材
IV. ①TU378.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 199009 号

内 容 提 要

本书在阐述了预应力结构的基本作用原理后, 对预应力工程中常见的结构体系的设计计算方法、预应力结构的新进展以及新方法均进行了论述。编写过程中力求语言简练、与相关标准和规范紧密衔接。

本书既可作为土木工程专业本科和专科的专业基础课教材, 又可作为工程技术人员的参考书。

中国计量出版社 出版

地 址 北京和平里西街甲 2 号 (邮编 100013)

电 话 (010) 64275360

网 址 <http://www.zgjl.com.cn>

发 行 新华书店北京发行所

印 刷 北京市媛明印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.5

字 数 334 千字

版 次 2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

印 数 1—2 000

定 价 28.00 元

如有印装质量问题, 请与本社联系调换

版权所有 侵权必究



• FOREWORD •

预应力混凝土结构以其独特的结构形式和使用性能成为当今最有发展前途的现代工程结构，现代预应力结构的主要特征由原来较为简单的预应力简单受力结构构件转变为复杂受力结构。开展对这一领域的研究，对于节约材料、降低造价、发展新型结构体系均有重要作用。

本书在阐述了预应力结构的基本作用原理后，对预应力工程中常见的结构体系的设计计算方法、预应力结构的新进展、新方法均进行了论述。编写过程中力求语言简练、与相关标准和规范紧密衔接。

其中第一章阐述了预应力的基本概念与发展方向，第二章、第三章、第四章、第五章注重阐述预应力混凝土构件的基本原理及预应力体系的组成，第六章至第九章重点介绍了各种预应力体系的计算方法，在第十章中介绍了各种预应力结构的构造要求，第十一章中介绍了纤维聚合物筋预应力混凝土结构，并根据作者的试验数据介绍了这类构件的设计计算方法。

本书知识面宽，具有较强的教学实用性和较宽的专业适应面，在内容上力求理论概念清晰，深入浅出，做到基础理论知识适度，强化工程实际应用，注重土建工程专业的实用性，使读者易于理解、便于应用。

本书符合最新的标准和规范，密切结合我国的工程实际，充分反映最新的科研成果。

本书在编写时力求紧密结合标准和规范，语言通俗易懂，内

容条理清晰、深入浅出、循序渐进、理论联系实际。

本书既可作为土木工程专业本科和专科的专业基础课教材，又可作为工程技术人员的参考书。

本书由东北林业大学的程东辉和黑龙江科技学院的薛志成编著，两位编著者都是多年从事教学工作的一线教师。另外，硕士研究生贾莹、邢剑兵、陈默等人对书中的插图进行了绘制与整理，并对各章节的例题进行了核算。

由于编著者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，敬请读者批评和指正。

编 者

2010 年 1 月

教材编委会

主 任 赵惠新 刘国普 刘宝兰

副主任 李保忠 景海河 丁 琳 薛志成 杨国义

委 员 (按姓氏笔画排序)

邓一兵	王福彤	付伟庆	左宏亮
刘汉青	吕名云	乔雅敏	杜永峰
张燕坤	杨 璐	郦 伟	赵文军
姜连馥	高建岭	徐晓红	程 桢
程东辉	程选生	裴 强	潘 睿

策 划 刘宝兰 李保忠

编写说明

近年来,建筑业的快速发展对整个社会经济起到了良好的推动作用,尤其是房地产业和各项基础设施建设的深入开展与逐步完善,使国民经济逐步走上了良性发展的道路。与此同时,建筑行业自身的结构性调整也在不断进行,这种调整使其对本行业的技术水平、知识结构和人才特点提出了更高的要求。为此,教育部对普通高校“土木建筑类”各专业的设置和教材也多次进行了相应的调整,使“建筑工程”和“交通土建工程”等相关专业逐步向“土木工程”转化,“十一五”期间,这种转化将进一步得到完善,这将使“土木工程”的内涵大大拓宽。所以,编写高等院校土木建筑类各专业所需的基础课和专业课教材势在必行。

针对这些变化与调整,由中国计量出版社牵头组织了“十一五”高等学校通用教材(土木建筑类)的编写与出版工作,该套教材主要适用于应用型人才培养院校的建筑工程、工程管理、交通土建以及水利工程等相关专业。该学科具有发展迅速、技术应用性强的特点,因此,我们有针对性地组织了黑龙江科技学院、黑龙江大学、兰州理工大学、北方工业大学、黑龙江工程学院、广东惠州学院、深圳大学、哈尔滨工程大学、东北林业大学、大庆石油学院、大连大学、哈尔滨学院以及黑龙江东方学院等45所相关高校中兼具丰富工程实践和教学经验的专家学者担当各教材的主编与主审,从而为我们成功推出该套框架好、内容新、适

应面广的好教材提供了必要的保障，以此来满足土木建筑类各专业高等教育的不断发展和当前全社会范围内建设工程项目安全体系建设的迫切需要；这也对培养素质全面、适应性强、有创新能力的高技术专门人才，进一步提高土木建筑类各专业教材的编写水平起到了积极的推动作用。

针对应用型人才培养院校土木建筑类各专业的实际教学需要，本次教材的编写尤其注重了理论体系的实用性与前沿性，不仅将建筑工程领域科技发展的新理论合理融入教材中，使读者通过教材的学习可以深入把握国际建筑业发展的全貌，而且使学生通过学习能将教材中的理论迅速应用于工程实践，这对我国新世纪应用型人才的培养大有裨益。相信该套教材的成功推出，必将会推动我国土木建筑类高校教材体系建设的逐步完善和不断发展，从而对国家的新世纪人才培养战略起到积极的促进作用。

教材编委会

2010 年 1 月

目 录

• CONTENTS •

第一章 绪论	(1)
1.1 预应力混凝土结构的基本原理	(1)
1.2 预应力度	(2)
1.3 预应力混凝土结构的分类	(4)
1.4 预应力混凝土的发展	(5)
第二章 预应力混凝土结构材料	(7)
2.1 预应力混凝土的选用	(7)
2.2 预应力钢筋的选用	(11)
2.3 非预应力钢筋	(17)
2.4 留孔及灌浆材料	(18)
第三章 预应力筋张拉及锚固体系	(19)
3.1 预应力筋张拉方法	(19)
3.2 预应力筋的张拉设备	(21)
3.3 预应力筋锚固体系	(24)
第四章 张拉控制应力及预应力损失	(30)
4.1 张拉控制应力与张拉程序	(30)

4.2	预应力损失的计算	(31)
4.3	预应力损失组合与有效预应力计算	(38)
4.4	预应力损失计算例题	(38)
4.5	预应力损失的简便估算方法	(41)
4.6	预应力钢筋的锚固长度与传递长度	(42)
第五章	部分预应力混凝土结构设计	(44)
5.1	轴心受拉构件设计计算	(44)
5.2	受弯构件设计计算	(51)
5.3	局部承压设计计算	(56)
5.4	斜截面抗剪设计计算	(61)
5.5	受弯构件变形计算	(65)
5.6	裂缝宽度计算	(67)
第六章	预应力混凝土超静定结构设计	(76)
6.1	结构特点	(76)
6.2	线性变换与吻合束	(78)
6.3	等效荷载	(82)
6.4	荷载平衡法	(87)
6.5	预应力混凝土连续梁设计	(95)
6.6	内力重分布与弯矩调幅	(99)
第七章	无粘结部分预应力混凝土结构设计与计算	(105)
7.1	概述	(105)
7.2	无粘结预应力钢筋极限应力	(106)
7.3	无粘结预应力混凝土受弯构件的力学性能	(110)
7.4	无粘结部分预应力混凝土受弯构件正截面承载力计算	(111)
7.5	无粘结部分预应力混凝土结构正常使用极限状态验算	(116)

第八章 后张无粘结预应力混凝土平板楼盖设计	(130)
8.1 概述	(130)
8.2 无粘结预应力混凝土平板楼盖设计方法	(132)
8.3 板中受力钢筋布置	(141)
8.4 设计步骤	(144)
8.5 构造要求	(145)
第九章 预应力混凝土框架结构设计	(157)
9.1 概述	(157)
9.2 设计原则与结构选型	(157)
9.3 设计内容与方法	(160)
9.4 预应力框架柱的第三弯矩	(166)
9.5 预应力框架梁加腋的考虑	(167)
第十章 预应力混凝土施工技术及结构构造	(175)
10.1 有粘结预应力混凝土施工技术	(175)
10.2 无粘结预应力混凝土施工技术	(184)
10.3 预应力混凝土构造的一般要求	(187)
10.4 预应力混凝土梁的构造措施	(190)
10.5 无粘结预应力混凝土楼盖构造设计	(193)
10.6 预应力混凝土框架结构构造	(196)
第十一章 预应力纤维聚合物筋混凝土结构	(201)
11.1 概述	(201)
11.2 FRP 筋的力学性能	(201)
11.3 FRP 筋混凝土构件的力学性能	(206)

11.4	无粘结 FRP 筋锚具的制作	(210)
11.5	无粘结预应力 FRP 筋混凝土梁的设计	(213)
11.6	纤维增强聚合物筋在工程的应用	(215)
11.7	FRP 筋混凝土构件存在的问题	(217)
参考文献		(218)

第一章 绪 论

1.1 预应力混凝土结构的基本原理

钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两种材料构成,是土木工程中应用最为广泛的一种结构形式。但是,由于混凝土本身抗拉强度很低,在使用过程中经常出现裂缝,限制了钢筋混凝土结构的应用。为解决这一问题,人们提出了预应力钢筋混凝土结构的概念。

预应力是预加应力的简称,这一名字出现的历史虽不很长,但其思想是古老的,其基本原理在几世纪以前就已运用。

所谓预应力混凝土结构,就是通过人为方式引入某一数值的反向荷载、用以部分或全部抵消使用荷载的一种加筋混凝土。如在混凝土受弯梁中,预先在梁的受拉区施加一轴向应力,产生预压作用,使梁受拉区在产生拉应力之前必须克服所施加的预压应力,从而改善了构件的使用性能。在钢筋混凝土构件中,一般是依靠使用前张拉钢筋和钢绞线达到目的。为充分说明预应力混凝土结构的工作原理,现以最简单的混凝土简支梁的形式来阐述预应力结构的基本原理。如图 1—

1 所示,在外荷载 F_1 作用下,简支梁会产生如图中虚线所示的弯曲变形,由于混凝土抗拉强度很低,梁受拉区很快会产生裂缝。如果此时在梁的受拉区作用有偏心力 F 。 F 会在梁的下边缘产生压应力 σ_c 。在梁的两端施加预应力 N 后,该梁截面下缘纤维的应力状态将是

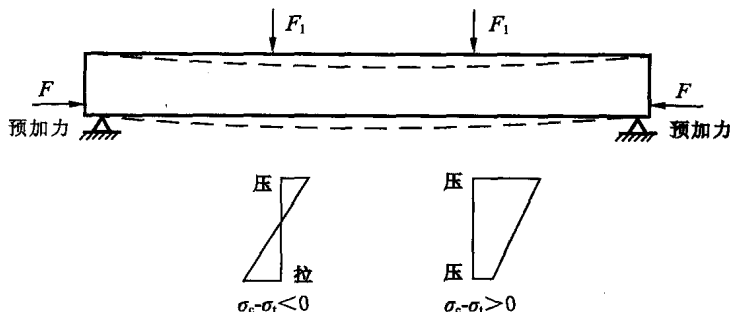


图 1—1 预应力混凝土截面应力分析

由 F_1 产生的拉应力 σ_t 和由 F 产生的压应力 σ_c 的合力。由此可见,外荷载在受拉区产生的作用必须先抵消预加力对受拉区产生的压应力,然后才会使混凝土受拉。因此,预应力的作用可部分或全部抵消外荷载产生的拉应力,从而提高结构的抗裂性,延迟裂缝的开展,也会减小裂缝宽度。

预应力的存在使得预应力钢筋混凝土构件与普通钢筋混凝土构件相比发生了下列的变化:由脆性材料转变为弹性材料。即普通钢筋混凝土构件抗拉弱而抗压强,是一种典型的脆性材料,预应力钢筋混凝土构件通过在受荷前对受拉区混凝土的预压,使得构件受荷后必须先抵消这部分的预压力。在通常情况下,由于预压力的存在,构件在使用过程中一般是不出现裂缝的,甚至不会出现拉应力,在这种情况下混凝土的应力、应变、挠度等的计算均可按弹性材料的计算公式考虑。

通过以上分析可知,预应力混凝土构件具有如下主要优点:



①抗裂性好,刚度大。

由于对构件施加预应力,大大推迟了构件裂缝的出现,在使用荷载作用下,构件可不出现裂缝或使裂缝推迟出现,因而也提高了构件刚度,增加了结构的耐久性。

②节省材料,减轻结构自重。

由于预应力混凝土构件提高了抗裂性和刚度,因此对于一些大跨度构件来说,可以采用比一般钢筋混凝土构件小得多的截面就可实现较大的跨度。根据实际工作经验,预应力混凝土结构比普通钢筋混凝土结构节省 20%~40% 的混凝土和 30%~60% 的钢筋,与钢结构相比,节约一半左右的造价。

③提高构件的抗剪能力。

预应力的存在抑制了斜截面主拉应力的出现时间,对斜裂缝的开展起到抑制作用,提高了斜截面的抗剪能力。

④提高构件的抗疲劳性能。

预应力钢筋的存在使得在使用阶段因加载或卸载所引起的截面应力变化幅度相对很小,故可提高抗疲劳强度,这对承受动荷载作用的结构很有利。

⑤提高受压构件的稳定性。

因为混凝土的抗压强度很高,故钢筋混凝土受压构件一般都能有效地工作。但是当受压构件长细比很大时,在其受到一定的偏心压力后,便容易被压弯,以致丧失稳定而破坏。如果对钢筋混凝土柱施加预应力,使纵向受力钢筋张拉得很紧,不但预应力钢筋本身不易压弯,而且可以帮助周围的混凝土提高抗压弯能力,从而提高构件的稳定性。

⑥扩大了钢筋混凝土结构的应用范围。

预应力混凝土结构由于提高了抗裂度和刚度,可以采用高强钢材,结构自重减小,因此钢筋混凝土的应用范围扩大。首先可以应用在大跨度工程上。例如非预应力屋架,一般跨度做到 18m,预应力混凝土屋架可以扩大到 20~30m 甚至更大。普通混凝土吊车梁一般做到 6m,预应力混凝土吊车梁做到 12m 和 18m。此外,大型油库、水池等抗渗性要求比较高的结构,采用预应力混凝土都能取得良好的效果。

但是任何事情都是相对的,预应力混凝土结构也有自身的局限性:

①生产工艺较复杂,对施工质量要求高,故需配备一支技术较熟练的专业队伍。

②需要有一定的专用设备,如张拉机具、灌浆设备等。先张法需要张拉台座;后张法需要耗用数量较多、并要求有一定加工精度的锚具等。

③预应力混凝土结构的开工费用较大,对于构件数量较少的工程成本较高。

但是,以上缺点是可以设法克服的。例如应用于跨径比较大的结构,或跨径虽不大但构件数量很大时,采用预应力混凝土就比较经济。总之,只要从实际出发,合理进行设计和妥善安排,预应力混凝土结构就能充分发挥其优越性。

1.2 预应力度

预应力度,是度量预应力混凝土结构施加预应力大小程度的概念。针对这一概念各国学者发展了不同的关于预应力的表达式。

(1) 应力比预应力度

中国学者将预应力度定义为受拉区控制截面由预应力钢筋产生的有效预压应力与使用荷载产生的应力之比, 计算表达式为:

$$K_{fo} = \frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{sc}} \quad (1-1)$$

式中 K_{fo} ——应力比预应力度;

σ_{pc} ——预应力钢筋在受拉区边缘混凝土产生的有效预压应力;

σ_{sc} ——短期荷载效应组合下在混凝土边缘产生的拉应力。

对轴心受拉构件: $\sigma_{sc} = N_s / A_0$

对受弯构件: $\sigma_{sc} = M_s / W_0$

如果构件截面的弹性抵抗矩为 W_0 , 则上述有关预应力度表达式可写为:

$$K_{fo} = \lambda = \frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{sc}} = \frac{\sigma_{pc} W_0}{\sigma_{sc} W_0} = \frac{M_d}{M_s} \quad (1-2)$$

式中 M_d ——预应力筋偏心产生的弯矩;

M_s ——荷载短期效应产生的弯矩。

(2) 表达为消压弯矩与全部使用荷载弯矩之比的预应力度

Bachmann, H 将预应力度定义为消压弯矩与全部使用荷载弯矩之比, 计算公式为:

$$\lambda = \frac{M_d}{M_G + M_Q} \quad (1-3)$$

式中 λ ——预应力度;

M_d ——为抵消预应力筋产生的预压力所需的弯矩值;

M_G 、 M_Q ——由恒载、活载产生的弯矩。

(3) 预应力比率

美国的 A. E. Naaman 教授提出的预应力比率的定义为: 在极限状态下, 由预应力筋所提供的抵抗弯矩与由非预应力筋和预应力筋共同提供的抵抗弯矩的比值, 称为预应力比率, 即

$$PPR = \frac{M_p}{M_u} \quad (1-4)$$

式中 M_p ——由预应力筋提供的抵抗弯矩;

M_u ——由预应力筋和非预应力筋共同提供的抵抗弯矩。

根据抗弯设计理论, 上式可写成:

$$PPR = \frac{A_p f_{py} \left(h_p - \frac{x}{2} \right)}{A_p f_{py} \left(h_p - \frac{x}{2} \right) + A_s f_y \left(h_s - \frac{x}{2} \right)} \quad (1-5)$$

式中 A_p 、 A_s ——预应力筋和非预应力筋的截面面积;

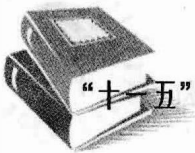
f_{py} 、 f_y ——预应力筋和非预应力筋的抗拉强度设计值;

h_p 、 h_s ——预应力筋合力点, 非预应力筋合力点取消至混凝土受压区最外边缘的距离;

x ——混凝土受压区高度。

如果近似认为 $h_p = h_s$, 公式(1-5)可写成:

$$PPR = \frac{A_p f_{py}}{A_p f_{py} + A_s f_y} \quad (1-6)$$



1.3 预应力混凝土结构的分类

1.3.1 按施工工艺分类

预应力混凝土结构根据其预应力施工工艺的不同,可分为先张法和后张法两种:先张法指采用永久或临时台座在构件混凝土浇筑之前张拉预应力筋,待混凝土达到设计强度和龄期后,将施加在预应力筋上的拉力逐渐释放,在预应力筋回缩的过程中利用其与混凝土之间的粘接力,对混凝土施加预压应力。

后张法是指在构件混凝土的强度达到设计值后,利用预设在混凝土构件内的孔道穿入预应力筋,以混凝土构件本身为支承张拉预应力筋,然后用特制锚具将预应力筋锚固形成永久预加力,最后在预应力筋孔道内压注水泥浆防锈,并使预应力筋和混凝土粘结成整体。具体可参见第三章的有关内容。

1.3.2 按预应力度分类

按照中国土木工程学会的《部分预应力混凝土结构设计建议》,根据预应力度的不同,将预应力混凝土分为全预应力混凝土结构、部分预应力混凝土结构和钢筋混凝土结构三类。所谓全预应力混凝土结构,即在全部荷载最不利组合作用下,混凝土受拉边缘不出现拉应力,整个截面处于受压状态;而部分预应力混凝土结构是指介于全预应力混凝土构件和钢筋混凝土构件之间的预应力混凝土结构,部分预应力混凝土结构包括 A 类预应力混凝土构件和 B 类预应力混凝土构件两种类型。A 类预应力混凝土构件是在正常使用极限状态下构件的预压区(受拉区)混凝土的正截面拉应力不超过规定的限值。B 类预应力混凝土构件是指混凝土的正截面拉应力允许超过规定的限值,但出现裂缝时,裂缝宽度不得超过允许的限值。

可以用预应力度表达式来表示上述的分类:

$\lambda(\text{或 } K_{f0}) > 1.0$ 时,即 $\sigma_{pc} > \sigma_{sc}$,为全预应力混凝土结构;

$\lambda(\text{或 } K_{f0}) = 0$ 时,即 $\sigma_{pc} = 0$,为普通钢筋混凝土结构;

$0 < \lambda(\text{或 } K_{f0}) < 1.0$ 时,即 $0 < \sigma_{pc} < \sigma_{sc}$,为部分预应力混凝土结构。

通常为保证混凝土的预压效果, $\lambda(\text{或 } K_{f0})$ 取值通常在 0.6~1.0 之间。

1.3.3 按预应力钢筋与混凝土间的粘结状况分类

根据预应力钢筋与周围混凝土的粘结状况,预应力混凝土构件可分为有粘结预应力混凝土结构和无粘结预应力混凝土结构两类。

有粘结预应力混凝土结构,是指沿预应力筋全长方向预应力筋完全与周围混凝土或水泥砂浆粘结在一起的预应力混凝土结构。先张预应力混凝土结构和预设孔道、穿筋压浆的后张预应力混凝土结构均属此类。

无粘结预应力混凝土结构,是指预应力筋伸缩变形自由、不与周围混凝土或水泥砂浆粘结的预应力混凝土结构。这种预应力混凝土结构采用的预应力筋全长涂有特制的防锈油脂,并外套防老化的塑料管保护。

1.3.4 按预应力筋在混凝土构件中所处的位置分类

按预应力筋在体内与体外位置的不同,预应力混凝土可分为体内预应力混凝土结构与体外预应力混凝土结构两类。

所谓体内预应力混凝土结构,是指预应力筋布置在混凝土构件体内。先张预应力混凝土以及预设孔道穿筋的后张预应力混凝土结构等均属此类。

体外预应力混凝土结构为预应力筋布置在混凝土构件体外的预应力混凝土结构。混凝土斜拉桥与悬索桥属此类结构的特例。

1.4 预应力混凝土的发展

随着材料科学及理论科学研究的不断深入,预应力混凝土结构从设计理论到材料工艺及施工方法均不断地发展与变化,其发展趋势主要体现在以下几个方面:

1. 设计思想方面

随着工程界逐渐认识到全预应力混凝土结构的不经济性和使用功能的限制,部分预应力混凝土结构的设计思想逐渐被大众所接受,设计人员可以根据结构对荷载及经济的要求合理选择预应力度,以求设计出符合要求的结构。

同时,在设计理念上对预应力混凝土结构由传统的以弹性分析为基础转向采用概率极限状态设计方法和结构可靠度理论转变。对超静定结构的次内力的分析也在研究的基础上逐步得到统一。

2. 材料的研究与发展

由于预应力混凝土结构的特点,使得高强钢筋、高标号混凝土得以在工程中普遍应用。研究表明:对于混凝土的要求,在通常情况下其耐久性能要求要比对强度的要求更高,因此以具有良好的耐久性、高弹性模量、超和易性、高早强等性能为指标的高性能混凝土的研制与应用是预应力混凝土发展的重要方向。

预应力钢筋因加工工艺的问题,其塑性性能相对较差,目前能满足塑性性能要求的钢材的极限强度为 1800~2000MPa,虽然预应力钢材的本身性质在最近一段时间无重大进展,但在耐久性、新材料预应力钢筋和大吨位预应力锚具及张拉设备方面的研究均有所进展。近年来随着复合材料科学的发展,非金属预应力筋的研制得到了很大的发展,以碳素纤维聚合物筋、玻璃纤维聚合物筋、芳纶纤维聚合物筋为代表的非金属预应力筋具有轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳、非磁性等优点,具有替代预应力钢筋在混凝土构件中应用的巨大潜力。

3. 预应力结构体系

非金属复合材料筋在混凝土结构中的应用,可以明显改善结构中钢筋锈蚀的影响,从而使预应力混凝土结构体系得到更广泛的应用。但是对这类体系的研究仍有许多问题需要解决:如非金属预应力筋的锚固体系的研制应作进一步、深入的研究;这类构件受力机理、计算理论及设计方法等需做系统而全面的研究;而抗震性能、疲劳性能的研究从目前掌握的资料来看国内外开展的研究工作还比较少。

组合结构是预应力结构中新兴的、但是却有广阔发展前途的一种结构形式,适用于高层建筑、大型厂房、桥梁工程等重载且对截面尺寸有较严格要求的场合。预应力组合结构具有改善