

高效预应力混凝土工程实践

建设部科技发展司

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会

林太珍 饶 斌

夏靖华 陈惠玲

主编



中国建筑工业出版社

高效预应力混凝土工程实践

建设部科技发展司

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会

林太珍 饶 斌

夏靖华 陈惠玲

主编

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

为了全面反映高效预应力混凝土技术近年来在我国的应用和研究情况，由建设部科技发展司、中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会组织，本书共汇编有关高效预应力混凝土技术论文77篇，分房屋建筑、桥梁工程、特种结构、高效预应力材料四大部分，内容包括：高强钢材与高强混凝土的近期试验研究状况，预应力新结构的设计计算方法，预应力新的施工工艺和机具设备，高效预应力混凝土在各项工程中的实践与经验，高效预应力工程的经济效益分析，以及发展高效预应力混凝土的技术政策与措施等。

本书可供从事土木工程设计、施工、科研人员以及高等院校的有关师生学习参考。

* * *

责任编辑 胡永旭

高效预应力混凝土工程实践

建设部科技发展司

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会

林太珍 饶斌 主编
夏靖华 陈惠玲

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京昌平长城印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：26.25字数：636千字

1993年10月第一版 1993年10月第一次印刷

印数：1—6,000册 定价：18.80元

ISBN7—112—02164—2/TU·1660

(7184)

目 录

加强推广应用,把预应力技术推上一个新水平.....	1
大力发展预应力混凝土技术.....	5

一、房 屋 结 构

采用“预应力度法”设计高效预应力混凝土抗震结构.....	8
上海保税区双向高效预应力大柱网抗震框架“预应力度法”的应用实践.....	17
合肥化妆品厂综合车间双跨 19.5m 五层工业厂房结构设计.....	22
多层变跨整体式预应力混凝土框架的设计.....	27
马鞍山商业大厦部分预应力混凝土框架梁的设计与施工.....	34
高效预应力在深圳建筑中的部分推广运用.....	39
蛇口开发科技数字磁头扩建工程主厂房结构设计.....	42
32m 大跨度高效预应力混凝土多层框架设计与微振分析.....	48
高效预应力混凝土在南京建筑中的应用与发展.....	52
南京和平电影院高效预应力结构“预应力度法”设计与实践.....	56
大跨度装配式整体后张单层无伸缩缝框架体系.....	62
单层厂房高效整体预应力混凝土结构的应用.....	67
《无粘结预应力混凝土结构技术规程》简介.....	73
广东国际大厦主楼无粘结预应力楼盖施工.....	77
高层建筑无粘结预应力楼盖的“预应力度法”工程实践.....	87
中化大楼无粘结预应力平板.....	92
无粘结预应力现浇平板施工——福建省新图书馆书库工程.....	94
四跨 10m 无粘结预应力梁设计.....	99
18m 跨无粘结预应力混凝土拱肋板屋盖的结构设计与施工.....	102
国家教委电教中心无粘结预应力箱形基础底板的施工.....	105
无粘结预应力混凝土楼板在大开间,大进深住宅体系中应用.....	110
连续折线式无粘结预应力束在体育馆看台悬臂梁柱上的施工和研究.....	117
整体预应力装配式板柱结构的承载力公式.....	121
预应力混凝土在首都速滑馆工程中的应用.....	124
六角柱网预应力 24 块拼板结构研究.....	132
高效预应力框架抗震配筋探讨.....	139
无粘结部分预应力混凝土梁裂缝宽度的近似概率分析.....	147
预应力混凝土结构徐变分析.....	153
安徽省体育馆索桁屋盖悬索内力测试.....	159

谈谈防止预应力混凝土工型梁侧弯问题161

7.5m后张有粘结部分预应力混凝土悬臂梁的1/2.5模拟梁静载试验研究163

高效预应力混凝土框架结构的技术经济分析168

二、桥 梁 工 程

公路预应力混凝土桥的运用和发展173

我国铁路预应力混凝土桥梁的发展现状181

珠海大桥设计概况189

高效预应力混凝土箱形加劲梁在大跨度悬索桥中的应用197

三向预应力混凝土T构受力性能的研究203

无粘结PPC技术在桥梁工程中的应用——设计方法及工程实例208

体外预应力索在桥梁工程中的实践214

无粘结部分预应力混凝土结构在公路桥梁中的应用219

新型预应力装配式桥墩在新澳丞大桥中的应用224

预应力混凝土桥梁施工简介229

25m先张钢绞线与无粘结混合配筋空心板239

预应力钢绞线斜板梁设计、施工及试验243

从几座已建的桥梁谈悬臂施工长跨度桥梁施工效率问题254

无风撑预应力混凝土系杆拱桥设计与施工259

广州环城高速公路铁路北立交桥主桥设计263

无粘结预应力筋在紫竹立交桥中的应用269

跨度24、32m超低高度预应力混凝土铁路桥梁275

超高强钢绞线在先张法预应力混凝土空心板梁中的应用280

三、特 种 结 构

混凝土电视塔中预应力技术的应用283

南京电视塔预应力施工技术290

天津电视塔预应力施工技术295

中央电视塔塔体竖向预应力混凝土结构施工301

核电站安全壳结构设计概要310

“预应力度法”在秦山核电二期工程安全壳初步计算中的应用315

秦山核电厂安全壳预应力施工317

大亚湾核电站核岛钢筋混凝土安全壳“千吨”级预应力施工技术322

2500m³预应力混凝土球形水塔的设计与计算329

2500m³预应力混凝土球形水塔的施工334

扶壁式大型无伸缩缝水平向预应力地上矩形水池341

对污泥消化池设计中后张预应力工艺的分析和建议347

缠丝预应力钢筋混凝土污泥消化池设计与施工351

φ7高强度钢丝预应力管桩的研制与生产354

南京污水处理厂无粘结预应力圆形消化池设计与施工357

预应力混凝土旋转壳体结构极限状态分析361

四、高效预应力材料

高强混凝土及其在预应力混凝土结构中的应用365

预应力混凝土用新型材料的发展375

高强混凝土在国防工程中的研究与应用380

高强混凝土的研制与应用384

高强、超高强碱矿渣（JK）混凝土的性能与配筋梁试验研究389

UEA 微膨高强锚固材料的研究.....396

C60 泵送混凝土的研制与应用402

高效预应力混凝土结构的混凝土与钢丝绳绞线在我国的应用概况409

江阴华澄钢缆有限公司产品简介411

加强推广应用，把预应力技术推上一个新水平

林 太 珍

(建设部科技委委员)

一、发展预应力结构是我国建筑业的重要技术方向

开发推广预应力技术是建设部“七五”和“八五”科技计划重点项目。同时作为重点新技术项目也体现在我国国民经济和社会发展规划和八五计划纲要中。预应力混凝土结构是一种现代先进的结构形式，它具有很好的结构性能，可广泛应用于各种建筑工程。通过对钢筋和混凝土施加预应力，充分发挥了钢筋和混凝土各自的特性，可以改善结构的受力性能，提高结构功能，又能达到节约钢材和木材的显著效果。预应力结构具有的很多优点，使它成为当代工程建设的重要结构材料和高新结构技术。

我国是一个需要进行长期大规模基本建设的国家，但资源又比较紧缺，节钢节木一直是一个重要的课题。同时，随着我国经济的发展，各类大型、大跨、重载、高耸建筑工程不断增多，对建筑物的功能提出了更高的要求。工程建设的需要，节钢节木的需要，在客观上都促进了我国预应力技术的发展。发展预应力技术符合我国国情的，是我国建筑业的重要技术方向和建筑工业化的重要技术政策。

二、我国预应力技术取得了很大进展

从50年代我国第一个五年计划开始，我国建筑界就高度重视预应力结构的发展工作。众多的建筑科研单位、高等院校、设计施工企业大力开展了应用研究、理论研究和工程实践，不断推进了预应力技术在建筑工程的应用。特别是改革开放十多年来，预应力混凝土结构的应用范围、推广数量、材料品种、生产工艺及计算理论都有了很多新发展。经过工程技术人员三十余年的不懈努力，我国已经从学习国外先进经验进入了有自己创新的阶段，预应力技术已在我国建筑工程中发挥着重要作用。

1. 预应力中小混凝土构件推广应用产生了很大效益

我国的预应力技术是从50年代中期，采用冷拉钢筋、冷拔低碳丝等低强预应力钢筋开始，走的是一条以低强为主，逐步向中高强发展的技术路线，具有中国的特点。在城市住宅和农村建筑中，多年来已广泛采用了预应力混凝土楼板、屋面板及其它中小构件。这类“小预应力”混凝土年应用量约2000万立方米，冷拔低碳丝及其它低强预应力钢丝的用量约70~80万吨。与非预应力钢筋混凝土构件相比每年可节约钢材20~30万吨，还可节约水泥和木材。同时，我国“小预应力”还传播到东南亚一些发展中国家，为十多个发展中国家举办了技术培训班，并出口了部分机械设备和技术。近年来，我国开发了冷轧带肋钢丝（低强和中强），其应用已达2500万平方米。用冷轧带肋钢丝逐步替代冷拔低碳丝将或得更好的经济和社会效益。

2. 高效预应力混凝土结构应用范围不断扩大

在80年代初期,高效预应力技术的应用开始形成一定规模,各种后张体系得到应用,无粘结预应力、部分预应力技术也开始研究、开发和应用,高效预应力技术的应用范围不断扩大,形成了百花齐放,各种体系共存的新局面。高效预应力技术不仅应用于工业与民用建筑,在桥梁建筑、水工建筑、高耸结构和其它特种结构中都有着广泛的应用。随着应用范围的扩大,技术水平也在不断提高。

在工业建筑中,高效预应力技术广泛应用于多层工业厂房、大跨、大柱网厂房,如有粘结部分预应力框架、多跨无粘部分结预应力框架体系等,有的层数达到8层,单跨达到30m。在民用建筑中,无粘结预应力现浇平板结构广泛应用于高层建筑,如广东63层国贸大厦。预应力板柱体系、竖向预应力剪力墙体系、部分预应力框架体系等在民用和工业建筑中都得到应用。在桥梁建筑中,高效预应力技术已应用于多种结构型式,预应力T形刚构桥跨度达174m(重庆长江大桥),预应力连续梁桥跨度达180m(广东洛溪大桥),预应力斜拉桥跨度达602m(上海扬浦大桥)。高效预应力技术在电视塔中的应用,继建成386m的中央电视塔以后,又建成415.2m的天津电视塔及正在建设454m的上海广播电视塔。高效预应力技术在大型容器中也得到应用,无锡芦村的矩形曝气池超过10000m³,我国援建的阿尔及尔球形水塔达2500m³。高效预应力技术还被应用于秦山核电站安全壳中。这些工程的应用体现了很高的技术水平。

3. 预应力锚夹具、张拉机具性能有了较大提高

在80年代中后期,我国先后研制开发了适用于高强预应力钢丝、钢绞线的XM、QM、B&S、OVM等锚固体系及相应的张拉机具,使我国的锚夹具的技术性能进入了国际先进行列,促进了我国高效预应力技术的发展。目前,我国锚夹具的张拉力最大达到6000kN,并已在坝体锚固中得到应用。

4. 高强预应力钢丝、钢绞线和高强混凝土正在不断发展

在“七五”以前,我国只能生产少量1570MPa及以下的高强预应力钢丝,不能满足国内的需要。在“七五”期间,我国自行开发了1670MPa和1760MPa的低松弛和普通松弛的高强预应力钢丝。同时还从意大利等国引进生产了1860MPa的低松弛高强预应力钢丝、钢绞线。据统计,国内1991年高强预应力钢丝的产量达12万吨左右。高强预应力钢丝、钢绞线的生产在产品性能和产量上已基本能满足国内的需要,并有部分出口国外。

在我国,预应力结构采用混凝土通常是C30~C40。为了减轻结构自重,增加有效面积和提高混凝土结构的耐久性,我国从1987年开始系统研究C50~C80高强混凝土,研究了混凝土的配比、施工工艺、物理力学性能和构件受力性能,C60混凝土的应用已有260万平方米。高强钢丝、钢绞线的生产,高强混凝土的研究和应用,为进一步发展高效预应力技术提供了物质基础。

5. 计算理论和实验研究达到相当水平

为提高结构计算理论和工艺水平,我国做过大量的科学实验工作。如高效预应力的计算理论和设计方法,做过各种工程多种结构体系的试验研究,包括无粘结预应力和部分预应力结构的计算和设计方法,各种节点构造的试验研究,预应力度法的研究及重要工程的大模型试验等都达到相当水平。在研究、实验和工程实践的基础上,我国已建立了自己的预应力结构设计规范。

经过三十余年的科学研究和工程实践，我国的预应力技术已取得了长足的进步，既出了成果，也出了人才。一大批有着丰富学识和工程经验的预应力技术专业人才，正在为发展我国的预应力技术不断作出贡献。

三、加强研究开发和推广应用，把预应力技术推上一个新水平

我国的经济建设正在高速持续发展，按照到2000年的十年规划，预计我国城乡每年将完成建筑面积达12亿平方米的各类建筑，同时还有大量的城市和农村基础设施需要建设，预应力技术的应用有着广阔的前景。发展预应力技术对国家经济建设有着很现实的意义，同时也具备了物质条件和技术条件。为此很有必要加强推广应用预应力技术的工作：

1. 大力宣传和普及预应力技术

我国年应用预应力混凝土量达2000多万立方米，数量虽然不小，但预应力混凝土的质量有待提高，高效预应力的应用量和应用范围有待进一步发展，高强混凝土要推广，高效预应力技术需要进一步为广大设计和施工技术人员所掌握。因此，我们要加强宣传工作，包括对各级建设主管部门的宣传，宣传高效预应力技术的节钢、节木，提高建筑物功能的作用，宣传预应力技术的综合经济效益。同时，我们还要在设计、施工技术人员中大力普及预应力技术知识，进行理论知识和实用技术的培训，编写设计和施工手册及计算软件，为大规模应用预应力技术创造一个良好的技术环境。

2. 要重视建立预应力结构质量保证体系

保证预应力结构质量至关重要，包括设计、材料和施工工艺都应该有严格的质量要求。我国在冷拔低碳丝预应力中小构件方面，在**高强预应力钢丝和钢绞线及预应力锚夹具**的生产方面都还存在质量稳定的问题，有些是管理的问题，有些是工艺技术的问题。我国一些大型的锚夹具生产厂家近年来产品质量有很大提高，但我们的锚夹具的质量与瑞士、法国相比其差距是显然存在的。预应力锚夹具的质量和可靠性关系到重要的安全问题。我们要重视管理水平的提高和工艺的完善。还要争取建立国家级检测制度和实行生产许可证制度。

3. 新材料新技术有待进一步发展

冷轧带肋钢筋与冷拔低碳丝相比其性能的优越性很明显，辽宁等省市用冷轧带肋钢筋替代冷拔低碳丝提高了构件的质量，又取得了显著的经济效益和社会效益，对这方面的新技术新材料应积极推广应用。

在我国已建的预应力钢混凝土高层建筑中，其用钢量大大高于美国，这体现我们对**高强钢材、高强混凝土**应用还不广泛，对预应力混凝土原理和基本理论的理解尚有欠缺，实验研究工作及工程实践还不够。我们要参考国际上的先进设计方法和科技成就，在设计施工规范上也还要完善并与国际接轨。

4. 加强研究，开展协作，鼓励竞争，推动发展

预应力结构工程技术含量较高，是建筑业的一项高新技术，这项技术不仅需要扩大国内市场，而且还有进入国际建筑市场，参与国际竞争。为此，要加强研究，开展协作，鼓励竞争，实现精心设计和精心施工，做到切实保证工程质量、提高技术水平。现在有的地方已开始组织专业公司，对于推动预应力技术的发展有很好的作用，符合市场经济的方向，值得提倡和积极支持。

针对应用预应力技术的经济效益和社会效益，还应实行扶植政策，执行国务院《合理

化建议奖励条例》。江苏省已制定了关于预应力混凝土结构的设计和施工收费新办法，北京市、上海市已制定了奖励合理化建议者的具体实施办法，这些办法值得切实推行。我们应采取多种鼓励措施，推动预应力技术的发展。

从总体上来说，我国的预应力水平有了很大提高，但与国际水平仍有一定差距。我们的进步是明显的，我们的差距也是存在的。我们既不要妄自菲薄，也不要盲目乐观。我们要解决现存的问题，同时还要瞄准国际上的最新进展。我们要共同努力，积极赶上国际水平，为我国的经济建设做出新的贡献。

大力发展预应力混凝土技术

夏 靖 华

(中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会理事长)

我国从50年代末开始,由于国民经济建设任务大,钢材供应十分紧缺,决定有计划地在土木工程中推广应用预应力混凝土,经过40多年的努力,预应力混凝土取得了很大发展,已在房屋工程、铁道工程、公路工程、能源工程、水利工程、电力工程、通讯工程等方面建造了许多生产急需的工程,节约了大量钢材与投资,满足了生产需要,为祖国的经济建设立了功。

我国预应力混凝土的迅速发展,是工程建设界广大技术职工辛勤努力的结果,更主要的是有一条正确的指导方针,走自己的道路。这条方针是:在采用预应力筋方面,走低强、中强、高强并举、逐步向高强钢材发展的方针;在应用领域方面,走小、中、大结构并举,尽量在各行业中采用预应力混凝土的方针;在生产工艺方面走土、洋并举,逐步提高预应力装备的方针。目前,先张法施工大部分采用长线台座法,有条件的预制厂采用机组流水法生产;后张施工则从预制构件发展到在结构上张拉,向超静定预应力结构发展。这条方针,充分调动了群众的积极性,所以预应力混凝土的应用数量较大,应用的面也较广,应用的技术水平也有很大提高。

我国国民经济和社会发展十年规划和第八个五年计划纲要中提出:“从工程勘察,设计施工到建筑产品和建筑机械制造,都要积极采用先进适用技术,着重开发和推广节能、节地、节材住宅体系,高效预应力钢筋混凝土结构技术,地基基础和地下工程技术,粉煤灰综合利用技术,建筑防水技术,城市综合防灾技术等”。发展高效预应力钢筋混凝土结构技术已成为我国的一项重大技术政策,这是我们混凝土及预应力混凝土学会的一项光荣而艰巨的任务。这项政策的贯彻执行,一定会使我国预应力混凝土采用数量、应用领域、技术提高等方面有一个新的发展。

纲要中提出的高效预应力混凝土结构技术是指采用高强度预应力钢材和高强度混凝土用先进的设计概念、方法和先进的生产工艺设备制造质高价廉的预应力混凝土结构。这一技术不仅在土木工程中可以应用,还可以扩大应用于工业管道、压力容器、水力机架等方面;这一技术不仅可以用于混凝土结构,也可以用于钢结构等其它材料结构;这一技术的设备,不仅可以用于结构工程中,而且可以用作起重、牵引等方面。所以说,发展预应力技术与设备,有着广阔的应用前途。

采用预应力钢筋混凝土结构,不仅是为了节约钢材,而且可以改善结构功能,建造或解决其它结构材料难以解决的技术问题,下面举一些方面来说明:

(1) 增大房屋结构的经济跨度。在楼盖与屋盖结构中,用预应力技术,可以增加混

混凝土结构的经济跨度，增加使用面积，降低层高，节约材料，同时还可减少地震力，使房屋建造得更经济合理。

(2) 解决大跨度桥梁建造的技术难题。桥梁结构由于通车需要，桥面必须水平，这样跨度愈大，自重愈大，一般结构很难解决，采用预应力斜拉结构或预应力悬挂结构，可以跨越一般结构难以解决的跨度。

(3) 改善高耸结构的抗震、抗风性能。在高耸结构中，由于采用预应力技术，可以减少混凝土结构的变形，提高结构的恢复力特性，有利于抗震、抗风和结构的使用。

(4) 改变结构的受力状态，提高结构效能。悬臂结构，由于弯矩问题使悬臂跨度受到限制，不能满足使用要求，采用预应力后，可以平衡弯矩，变成偏心受压构件，就可以增加悬臂跨度，满足使用要求。

(5) 减少或者取消伸缩缝，提高防水性能。钢筋混凝土结构，由于混凝土材料存在不可克服的收缩特性和温度伸缩变化，结构需要设置伸缩缝，以避免裂缝后影响使用。采用预应力技术，使其在混凝土中产生预压力，抵消收缩和温度裂缝达到防水的目的。

(6) 控制水平结构在施工中的变形，满足使用要求。在高层建筑中，往往由于房屋使用功能的要求，上下层之间不能直接采用墙或柱传递竖向荷载，需要设置水平结构（称为转换结构或转换层）承受上层传来的竖向荷载。在施工过程中，由于竖向荷载不断加大，转换结构的挠度不断增加，影响结构使用，可以用加预应力的方法来调整转换结构变形，保持其在正常使用状态。

(7) 用作结构加固，增加结构的整体性和安全性，用预应力技术加固法，有较显著的效益，使加固部分能很好地与原结构共同工作，保证结构的安全性，满足结构的变形和裂缝要求。

(8) 用作锚固，增加稳定性。预应力锚杆是防止岩体滑坡，深基础开挖时挡土以及隧道中防止岩体、土体坠落等有效措施。

(9) 用于高压容器，防止泄漏。如高压釜核安全壳等，不仅可以防泄漏，而且有防爆炸的效果。

(10) 提高结构耐久性。混凝土结构的耐久性与混凝土等级和受力状态有密切关系，混凝土等级高，其耐久性也提高，预应力混凝土需要用高强度的混凝土，所以其材性的耐久性比一般混凝土结构高，同时由于对混凝土施加了预压应力，防止或减少混凝土结构的裂缝，也提高了结构的耐久性。

预应力混凝土有许多优点和好处，需要大力宣传，大力推广，但在推广应用上还存在一些问题，这些问题有的是属于思想认识方面的，有的是属于行政管理方面的，有的是属于技术方面的，需要加以综合解决，才能使预应力混凝土有一个新的发展。

(1) 衡量预应力混凝土结构的优点，不仅看到其节约钢材的效益，更重要的要看到它提高了结构的功能。不能只计算每立方米混凝土的造价，每平方米建筑面积的造价，如果只从这方面看，也许不一定比普通混凝土结构便宜，但如把建筑物的使用功能，运营管理费用和使用效益（如是工厂则是生产效益），综合计算预应力混凝土结构肯定是便宜的。例如一个纺织车间，采用预应力结构后扩大了柱网，可以多放纺织机，提高了产量，降低了结构层高，可以节约空调费用，所以综合效益比普通混凝土结构车间要高得多。

(2) 采用预应力混凝土结构，其设计和施工的难度、工作量都比钢筋混凝土结构要

大，而现在设计收费标准、施工定额标准，都没有充分体现出这一点，影响预应力混凝土的推广。建议调整收费标准，修订施工定额，扭转目前设计单位不愿意搞预应力设计，施工单位不愿意搞预应力施工的现象，建立按工作量和技術难易程度取费，按经济效益给予奖励的办法，鼓励采用预应力结构。

(3) 积极发展高强、低松弛钢绞线和钢丝，并降低价格，以提高节约钢材的效益；有计划地发展中强钢丝和冷轧细钢筋，逐步取代低碳冷拔丝，提高预应力筋质量，扩大应用面，同时对现在广泛使用的冷拔低碳钢丝应加强市场管理和质量检测，保证其应用质量。

(4) 发展与使用高强度钢材后相匹配的高强度混凝土，改善施工性能，保证混凝土质量。提高采用预应力混凝土的最低等级，提高预应力混凝土的耐久性。

(5) 在设计方面，要在概念设计上下功夫，根据预应力混凝土特点，设计出能充分发挥出预应力技术优越性的结构，要简化设计计算方法，使设计人员从繁琐的计算中解放出来，创造预应力结构的新形式，降低预应力结构的造价。

(6) 提高张拉锚固设备及其配套附件的质量与可靠性，发展新工艺，新机具，方便施工，提高施工效率。建立预应力锚夹具、设备和工程的国家检测中心，保证预应力混凝土结构的质量。

(7) 制定专门的预应力混凝土设计、施工规范和相应的材料、机具、设备锚夹具标准，规范标准要简单、实用，在质量上要有明确要求，在方法上不宜规定过死，使设计、施工、制造人员能有法律依据，又不限止其创造性和发展。

(8) 加强预应力混凝土结构的基础研究和应用研究。例如：高强预应力筋材料的研究，高强混凝土材料的研究，预应力损失值的综合研究，预应力结构随时间发展的性能和耐久性的研究，预应力结构遭受灾害（地震、火灾等）的性能研究，预应力锚固区性能及构造研究，预应力锚夹具的研究，预应力张拉设备的研究，预应力灌浆设备及材料的研究，无粘结预应力筋的生产工艺及隔离剂的研究，预应力结构设计方法的研究，预应力结构合理形式的研究，以及扩大预应力技术的工程使用等。

一、房屋结构

采用“预应力度法”设计高效预应力混凝土抗震结构

陈惠玲

(中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会秘书长)

一、概述

现代高效预应力混凝土结构设计具有抗震性能好的有限预应力混凝土或部分预应力混凝土越来越多，其配筋当前主要有四种类型：一是全部配高强预应力筋并随预应力度大小确定张拉控制力；二是全部配中强钢材（冷拉钢筋、低炭冷拔钢丝或中强钢丝）施加适宜或足够的张拉控制力；三是同时配置高强度预应力筋和中、低强度螺纹变形钢筋的混合配筋，其预应力筋有足够的张拉力；四是配有同样的钢筋，一部分进行张拉，另一部分不张拉而作为普通钢筋的混合配筋。

通过应力比“预应力度法”，根据性能要求设计上述高效预应力结构，选择一定的施加预应力量（预应力度），以确定配有全部相同钢材时，定其预应力筋的张拉控制力，或配有高、中强度钢材混合筋结构中确定预应力筋配置量是极其简便的。

二、应力比预应力度计算公式及其优点

(一) 应力比预应力度的计算公式

预应力度定义为有效预压应力与使用荷载产生的应力之比（Chen Huiling），公式表达为：

$$\lambda = K_{f_0} = \gamma_{cro} = \sigma_h / \sigma = \sigma_{pc} / \sigma_{sc} \quad (1)$$

式中 $\lambda = K_{f_0} = \gamma_{cro}$ ——预应力度；

$\sigma_h = \sigma_{pc}$ ——有效预应力或称构件底部纤维混凝土应力为零时的减压（消压）应力，对于出现裂缝的预应力混凝土构件，即为裂缝又重新出现的应力；

$\sigma_{sc} = \sigma = \sigma_G + \sigma_Q$ ——由标准活荷载、恒荷载、短期效应组合外荷载在混凝土中产生的拉应力；

对轴心受拉构件：

$$\sigma_{sc} = N_s / A_0$$

对受弯构件：

$$\sigma_{sc} = M_s / W_0$$

对偏心受压偏心受拉构件:

$$\sigma_{sc} = N_s/A_o \pm N_s e_o/W_o$$

当采用无粘结预应力构件时, 式中 A_o 、 W_o 以 A 、 W 代之。

N_s ——纵向力;

M_s ——弯矩;

e_o ——纵向力至换算截面重心轴的距离;

A_o ——构件换算截面面积;

W_o ——换算截面抗裂验算边缘的弹性抵抗矩。

公式 (1) 乘以 W 或 W_o 时, 预应力度即为弯矩比 (Bachmann, H) 的表达式, 即

$$\lambda = K_{f_0} = \gamma_{cro} = \frac{\sigma_{pc} W_o}{\sigma_{sc} W_o} = \frac{M_d}{M_s} \quad (2)$$

式中 M_d ——有效预应力产生的抵抗弯矩或称减压弯矩, 对于出现裂缝后的预应力混凝土构件, 即为裂缝又重新出现的弯矩。

(二) 应力比预应力度计算的优点

笔者首次提出的应力比的预应力度计算具备如下优点:

1. 对加筋混凝土结构可进行系列分类

(1) 当 $\lambda = K_{f_0} = \gamma_{cro} = \sigma_{pc}/\sigma_{sc} \geq 1$, 为 I 类全预应力混凝土;

(2) $1 > \lambda = \gamma_{cro} = \sigma_{pc}/\sigma_{sc} \geq 1 - \gamma_{f_{tk}}/\sigma_{sc}$, 为 II 类有限预应力混凝土;

(3) $0 < \lambda = \gamma_{cro} = \frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{sc}} < 1 - \gamma_{f_{tk}}/\sigma_{sc}$, 为 III 类部分预应力混凝土;

(4) $\lambda = \gamma_{cro} = 0$, 为 IV 类普通钢筋混凝土;

f_{tk} ——混凝土抗拉强度标准值。

由上可见, 加筋混凝土结构系列的预应力度由 1 连续变化至零, 而 I 类和 IV 类结构为该系列的两个端点。

2. 具有应力的概念

将预应力度的应力比简便地转换为预应力度的应力差形式, 则具有明确的应力概念。这与新规范 (GBJ10—89) 相沟通, 而且同样可以进行 I 类和 IV 类结构的划分, 则有:

I 类 (一级, 零应力控制): $\sigma_{sc} - \sigma_{pc} \leq 0$, 全预应力;

II 类 (二级, 拉应力控制): $\sigma_{sc} - \sigma_{pc} < \alpha_{ct} \gamma_{f_{tk}}$, $0 < \alpha_{ct} < 1$, α_{ct} 为拉应力限制系数, 随结构类型、环境、材料特点取定, 有限预应力;

III 类 (三级, 小裂缝宽度控制): $\sigma_{sc} - \sigma_{pc} > \gamma_{f_{tk}}$, 部分预应力;

IV 类 (大裂缝宽度控制): $\sigma_{pc} = 0$, 普通钢筋混凝土。

3. 具有抗裂系数的概念

将应力比的预应力度加上一个常数 (即混凝土自身抗裂度), 亦简便转换出预应力结构的抗裂系数, 这与原规范 (TJ10—74) 相沟通。即

$$\gamma_{cr} = K_f = \lambda(K_{f_0}) + K_{f_h} = \lambda(\gamma_{cro}) + \gamma_{crc}, \quad \gamma_{crc} = \gamma_{f_{tk}}/\sigma_{sc}$$

同样, 用抗裂系数对加筋混凝土结构进行系列分类如下:

I 类: $\gamma_{cr} = K_f \geq \sigma_{pc}/\sigma_{sc} + \gamma_{f_{tk}}/\sigma_{sc} \geq 1 + \gamma_{f_{tk}}/\sigma_{sc}$, 全预应力;

II 类: $\gamma_{cr} = K_f \geq 1 - \gamma_{f_{tk}}/\sigma_{sc} + \gamma_{f_{tk}}/\sigma_{sc}$, $\gamma_{cr} \geq 1$, 有限预应力;

Ⅲ类: $\gamma_{cr} = K_f < 1 - \gamma f_{tk}/\sigma_{sc} + \gamma f_{tk}/\sigma_{sc}$, $\gamma_{cr} < 1$, 部分预应力;

Ⅳ类: $\gamma_{cr} = K_{fh} = \gamma_{cr} = \gamma f_{tk}/\sigma_{sc}$, 普通钢筋混凝土。

4. 具有拉应力限制系数 α_{ct} 概念

由预应力度的应力差公式得混凝土拉应力限制系数 $\alpha_{ct} \geq (\sigma_{sc} - \sigma_{pc})/\gamma f_{tk}$, 用 α_{ct} 进行分级:

一级全预应力 $\alpha_{ct} \leq 0$

二级有限预应力 $0 < \alpha_{ct} \leq 1$

三级部分预应力 $\alpha_{ct} > 1$

混凝土拉应力限制系数 α_{ct} 随结构类型、性能、环境、材料可取不同值, $\alpha_{ct} \leq 1$ 时, 即为新的混凝土结构规范中抗裂验算的拉应力限制系数法, 但对于二级构件取值为 $\alpha_{ct} = 0.3$ 、 0.5 、 1.0 三个断点常数, 由于二级有限预应力 α_{ct} 在 $0 \sim 1$ 的区间内为连续变化, 设计时可取 α_{ct} 区间的任意适宜值。对于三级部分预应力 $\alpha_{ct} > 1$, 一般 < 3 时, 长期裂缝宽度 W 多在 0.2mm 以内 (一般 $\alpha_{ct} < 1.5$ 、 2.0 、 2.5 , 对应的 $W < 0.05$ 、 0.10 、 0.15mm) 故简化可不进行裂缝宽度计算。

用 α_{ct} 连续分级, 这不仅沟通着与新规范 (GBJ10—89) 之间的联系, 而且克服其抗裂计算过严规定而不应用于高强钢丝、钢绞线高效预应力结构的不足, 发展了高效预应力结构与计算理论。此法, 当 $\alpha_{ct} > 1$ 时, 亦实为名义拉应力法。这也沟通着公路桥涵规范 (JTJ023—85) 及英国预应力规范。

5. 应力比与弯矩比 (M_d/M_s) 的预应力度相比, 对于受弯构件或部分预应力框架横梁等结构, 采用弯矩比 M_d/M_s 的预应力度非常适合, 而无需涉及应力比、应力差预应力度的表达式。但应力比、应力差的预应力度不仅具备弯矩比的优点还克服了弯矩比预应力度计算公式不适用于轴心受力构件、缺乏应力概念、有限预应力与部分预应力结构分类混淆一起并无法区分的缺点。应力比是一种覆盖面宽、通用性强的预应力度公式。

6. 应力比预应力度公式与预应力大小、预应力损失以及混凝土有效预应力有关, 可反映荷载作用下结构边缘应力状态。

7. 应力比预应力度公式不仅适用于现代高效预应力抗震结构的四种预应力配筋设计, 而且通过该预应力度与强度承载力求出了预应力筋和普通钢筋, 亦可将预应力筋的极限能力与全部钢材的极限能力之比, 也能得出部分预应力比 PPR (Naaman, A.E) 及预应力指标 i_p (FIP, 1984)。

PPR 及 i_p 预应力度表达式中, 是以配置预应力筋和非预应力筋的面积多少及各自承担的极限抗弯或抗拉承载力出发的, 即

$$PPR = \frac{A_p f_{py}}{A_p f_{py} + A_s f_y} \quad (3)$$

f_{py} 、 f_y 为预应力筋及普通钢筋的抗拉强度设计值, i_p 为相应的抗拉强度求得, 该公式简单, 但这种表达式并未能反映出张拉控制力的大小和预应力损失大小、以及预应力筋和混凝土的有效预应力对使用性能影响, 缺乏应力特征。而且从区分全预应力、部分预应力和钢筋混凝土的界限看, 仅以截面中配置普通钢筋的为普通钢筋混凝土, 全部配预应力筋的称为全预应力混凝土, 配有混合钢筋的称为部分预应力混凝土。这种区分法, 势必包括不了全部采用高强预应力筋, 而张拉预应力值略低的, 或配置全部中强预应力筋, 而张拉略高一些, 且耗能与延性可满足抗震要求的有限预应力和部分预应力混凝土。此外, 无粘结

预应力筋因破坏时并未发挥其极限值，故 PPR 也应作变化后才适用于无粘结部分预应力结构。

8. 应力比预应力度法与荷载平衡法相比是与性能有关的一种定量荷载平衡法，避免了多种荷载平衡假设与试算。

三、应力比“预应力度法”

按应力比或应力差预应力度设计系列高效预应力混凝土结构的方法，简称预应力度法，即预应力混凝土结构由以往被动的校核预应力抗裂系数，发展为主动根据性能要求设计并满足承载能力，按预应力度大小设计结构，其步骤如下：

1. 选择应力比或预应力差的预应力度

$\lambda = \gamma_{cro} = \sigma_{pc} / \sigma_{sc}$ 或 α_{ct} ，这是使用阶段的预应力度，概念明确、反映性能，计算简便，优点甚多，通过该值求得减压弯矩 M_d 或减压有效预应力 σ_{pc} 。

$$M_d = \gamma_{cro} M_s = \lambda M_s$$
$$\sigma_{pc} = \gamma_{cro} \sigma_{sc} = \lambda \sigma_{sc} \quad \text{或}$$
$$\sigma_{pc} = \sigma_{sc} - \alpha_{ct} \gamma f_{tk}$$

2. 预应力度计算值，其值大小按表 1 中选用。

预 应 力 度 取 值 计 算 表 1

分类、应力差、 α_{ct}	应力比预应力度	暴 露 条 件	材 料 特 点
一 级 (零应力控制) $\sigma_{sc} - \sigma_{pc} < 0$ $\alpha_{ct} \leq 0$ I 类全预应力	$\lambda = \gamma_{cro} \geq 1$ $\gamma_{crc} = \gamma f_{tk} / \sigma_{sc}$ (受弯、偏心) $\gamma_{crc} = f_{tk} / \sigma_{sc}$ (轴拉)	1. 中 度 2. 承受重级制疲劳构件	高强、中强钢丝、钢绞线、热处理钢筋
		3. 耐渗、耐压、耐密闭、耐腐蚀 4. 严 重	各种预应力筋
二 级 (拉应力控制) $\sigma_{sc} - \sigma_{pc} \leq \alpha_{ct} \gamma f_{tk}$ $0 < \alpha_{ct} < 1$ II 类有限预应力	1. $\lambda = \gamma_{cro} \geq 1 - \gamma_{etc}$ 2. 如少利用一部分拉应力时： $\lambda = \gamma_{cro} \geq (1 \sim 1.2) - \gamma_{etc}$	1. 中 度 2. 重级制疲劳构件	各种冷拉与精轧螺纹钢筋
		3. 轻 度 4. 中级制疲劳构件	高强、中强、低炭钢丝、钢绞线，热处理与精轧螺纹钢筋 各种预应力筋
三 级 (裂缝宽度控制) $W_{max} \leq 0.2mm$ $\sigma_{sc} - \sigma_{cp} > \sigma_{ct} \gamma f_{tk}$ $1 < \alpha_{ct} < 3$ III 类部分预应力	$\lambda = \gamma_{cro} \geq 0.9 - \gamma_{crc}$	轻度或轻级制疲劳构件	高强、中强钢丝、钢绞线、热处理与精轧螺纹钢筋
	$\lambda = \gamma_{cro} \geq 0.8 - \gamma_{cro}$	轻度或轻级制疲劳构件	冷拉与精轧螺纹钢筋或高、中强混合配筋
	$\lambda = \gamma_{cro} \geq 0.7 - \gamma_{cro}$	轻 度	冷拉与精轧螺纹钢筋或高、中强混合配筋

注：1. 暴露条件：轻度：一般建筑的室内构件；
中度：室外构件，流动水中、土壤中的构件；
严重：冻融、侵蚀性等。

2. 对于无粘结预应力混凝土，宜设计预应力度 $\gamma_{cro} > 0.9 - \gamma_{crc}$ 以上或 $\alpha_{ct} < 1 \sim 1.5$ 的结构，亦即设计控制不裂或裂缝在 0.1mm 以内的结构。但考虑其无粘结预应力筋强度在构件破坏时未能充分发挥，应乘以 0.8 予以折减。

3. 凡满足 $\gamma_{cro} \geq 0.8 - \gamma_{crc}$ 的承受疲劳构件，因应力增量和裂缝宽度均在允许值内，故可不验算疲劳。

4. 对于有粘结或无粘结部分预应力框架计算时， α_{ct} 可取 ≤ 1.5 或， $\lambda = \gamma_{cro} \geq 0.8 - \gamma_{crc}$