

TU528/16

23713



华东预应力中心编

现代预应力混凝土 工程实践与研究

光明日报出版社

现代预应力混凝土工程 实践与研究

华东预应力混凝土技术开发中心编

光明日报出版社

预应力混凝土是建筑设计和施工中得到广泛应用的一项适用技术。我国自50年代开始试验推广，近几年来发展较快，在理论和实践方面有了突破。本书是由以东南大学、华东建筑设计院、上海纺织建筑工程公司、南京市第三建筑工程公司、中国建筑技术发展中心等单位组成的华东预应力混凝土技术开发中心，在总结该中心成立五年来的工程实践与研究的基础上，并邀请了北京市建筑设计院、北京市建筑工程研究所、中国建筑第一工程局研究所，交通部公路规划设计院等设计、科研、施工单位共同编写而成的。全书分为钢材与张拉锚固体系、后张预应力工艺、结构性能与设计研究、工程实践、经济分析等五部分。文章所反映的预应力实践经验和数据以及研究成果，具有国内先进水平，内容丰富，适用面广，对从事预应力混凝土房屋、桥梁、水利及特种结构的设计、施工、教学与科研人员均有重要参考价值，也可供各种预应力混凝土培训班、研讨班使用。

现代预应力混凝土工程实践与研究

华东预应力混凝土技术开发中心编

*

光明日报出版社出版(北京永安路106号)

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：15.25 字数：380千字

1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷

印数1—7000册 定价：7.90元

ISBN 7—80014—524—7/T·015

序 言

近十年来,我国预应力混凝土技术和应用有了突飞猛进的发展。这不仅表现在我国华东地区、北京地区和其他地区建造了不少出色的现代预应力混凝土工程,而且反映在高强预应力钢材、张拉锚固体体系和工艺以及结构理论和设计研究等方面也有很大进展。为了及时总结这些成就,加速预应力混凝土在我国的推广,并进一步提高这个领域的科学技术水平,去年秋天,华东预应力混凝土技术开发中心决定编写本书。因此,我们作为编辑者,拟定了主要编写内容和标题,组织本中心各成员单位——东南大学、华东建筑设计院、上海市纺织建筑工程公司、南京市第三建筑工程公司、天津预应力钢丝一厂和二厂、柳州建筑机械厂以及中国建筑技术发展中心,并邀请北京市建筑设计院、北京市建筑工程研究所、北京市工业设计研究院、交通部公路规划设计院、中国建筑第一工程局科研所、南京水泥工业设计院、江苏省建筑设计院、河南省交通规划设计院等单位共同参加编写。在各单位有关作者——不少是国内知名的专家、学者——的热诚支持和良好配合下,于今年二月完成了本书的编写任务。

本书定名为《现代预应力混凝土工程实践与研究》。这表明,它的主要目的是适应土建工程师们从事预应力混凝土工程设计和施工的需要的。同时,这本书对土建专业教师和科技工作者们也将有较大的参考价值。我们希望它可使土建人员少花费宝贵时间去阅读数以百计的关于预应力混凝土方面的学术论文和专著,而能在短时间内很快了解、掌握和应用国内这一领域的最新成果、经验和知识。因此,本书的内容,从目录上一看便知,很大部分,即第四章,是阐述国内已建成的、有代表性的预应力混凝土工程的设计方法和施工经验的。第一、二、五章则重点叙述我国的预应力钢材、各种张拉锚固体体系和预应力工艺以及预应力混凝土结构的经济分析。第三章,简介了部分研究新成果。为了设计和教学参考的需要,还附有预应力混凝土框架结构的设计计算实例。同时,在本书开头,还专文简述了我国现代预应力混凝土的发展现况与趋向,展望了预应力混凝土结构的未来,读者也许可从中得到有益的启发和帮助。

最后,我们特别感谢《建筑技术》杂志彭圣浩总编、徐家和副主编和王宪辉、张世杰以及东南大学杨建明等同志,没有他们的大力支持和帮助,本书的及时出版是不可能的。

吕志涛 杨宗放 陈寿华

1989.5 南京

KA627/06-05

目 录

我国现代预应力混凝土的发展现况与趋向	(1)
预应力混凝土结构的未来	(6)

第一章 钢材与张拉锚固体系

我国预应力混凝土用钢丝和钢绞线标准及其发展	(9)
钢丝束镦头锚固体系的开发与应用	(12)
钢绞线束JM _F 型锚固体系的改进和应用	(20)
钢绞线束XM型张拉锚固体系的应用	(23)
钢绞线束QM型张拉锚固体系的应用	(26)
精轧螺纹钢锚固体系的研制与应用	(30)
预应力筋-锚具组装件的锚固性能研究	(34)

第二章 后张预应力工艺研究

预应力筋用波纹管的应用研究	(40)
曲线预应力筋张拉伸长值计算	(44)
曲线预应力筋一端张拉工艺的研究与应用	(48)
后张法孔道灌浆的试验研究	(52)
竖向与环向孔道灌浆试验	(57)
无粘结预应力筋的制作与组装	(61)

第三章 预应力结构性能研究

部分预应力混凝土的若干结构性能及应用	(66)
部分预应力混凝土结构裂缝闭合性能及应用建议	(70)
预应力混凝土开洞梁的抗剪性能及设计方法	(74)
预应力混凝土框架的优化设计	(79)
部分预应力混凝土框架模拟结构试验	(83)
预应力混凝土三向交叉梁系结构性能试验研究	(87)
多跨连续预应力混凝土门式刚架试验研究	(91)
预应力混凝土框架节点在反复荷载下的性能	(96)
提高预应力混凝土结构延性措施的试验研究	(100)
无粘结预应力混凝土平板配筋形式的试验	(105)
整体预应力板柱结构拼板方案及试验研究	(109)
预应力混凝土超静定结构次弯矩及其影响的研究	(112)
曲线预应力筋锚固损失计算	(117)

第四章 预应力混凝土工程实践

上海色织四厂布机车间大跨度部分预应力混凝土多层框架结构工程	(121)
南京3503厂机电楼部分预应力混凝土框架与叠合楼板结构工程	(129)
南京水利科学研究院潮汐试验厅大跨度大开间预应力混凝土框架结构工程	(135)
南京五台山综合训练馆35m预应力混凝土 框架梁	(139)
合肥精毛纺织厂多层三跨预应力混凝土框架结构工程	(142)
安徽纺织一厂预应力混凝土框架柱	(148)
金陵饭店整浇预应力混凝土井式梁板屋盖结构工程	(152)
安徽师范大学预应力混凝土井式梁板屋盖结构工程	(157)
闵行工人俱乐部影剧场预应力混凝土三向网格梁屋盖结构工程	(162)
上海农业大厦两层双向预应力混凝土框架结构工程	(167)
北京工业大学食堂整体预应力混凝土板柱结构工程	(171)
中国专利局展厅整体预应力三角板柱结构工程	(177)
北京永安公寓无粘结预应力混凝土板墙结构工程	(180)
北京劳保用品公司大楼无粘结预应力混凝土平板结构工程	(183)
新民晚报大楼无粘结预应力混凝土平板结构工程	(189)
青岛铁港码头立交预应力混凝土弯梁桥	(192)
广东容奇预制拼装式连续梁桥	(197)
广东洛溪预应力混凝土连续刚构桥	(202)
南京韶山路水厂圆形水池预应力工艺	(210)
珠江水泥厂大型后张预应力混凝土筒仓	(213)

第五章 预应力混凝土经济分析

合肥精毛纺织厂主厂房多层三跨预应力混凝土现浇框架结构综合经济分析	(219)
--	---------

[附录 I] 部分预应力混凝土多层框架结构设计实例	(225)
---------------------------------	---------

[附录 II] 预应力钢材与设备厂介绍	(235)
---------------------------	---------

我国现代预应力混凝土的发展现况与趋向

现代预应力混凝土是指用高强钢材和先进的生产工艺以及先进的设计理论来生产的高效预应力混凝土,用以建造大柱网房屋、大跨度桥梁和大吨位特种结构等,以满足“四化”建设,并为国家节约更多的钢材。

一、我国现代预应力混凝土的发展现况

八十年代,我国预应力技术从单个构件发展到预应力结构新阶段;但传统的预应力构件仍占多数,预应力技术发展缓慢。近几年来,在全国经济体制改革和科技体制改革的新形势下,推动了科技和经济的进一步结合,预应力技术开发组织逐步形成,预应力技术有了较大的发展。归纳起来,主要有以下几方面。

1. 预应力钢材与张拉锚固体系在竞争中发展

近年来,我国预应力高强钢材的生产有了较大的发展。天津市预应力钢丝一厂与二厂生产的预应力钢丝与钢绞线,年产量达10万吨;最近,一厂还试制成功低松弛预应力钢丝与镀锌钢丝,投放市场。新华金属制品公司引进全套低松弛预应力钢绞线设备,生产高强度低松弛预应力钢绞线,年产量达1.5万吨。上海第三钢铁厂、首都钢铁厂和鞍山钢铁厂生产的高强精轧螺纹钢筋,可直接用连接器接长和用螺母锚固,不需冷拉和焊接,简化了施工。唐山钢铁厂生产的热处理钢筋,在铁路轨枕和先张构件中广泛采用。

在钢丝束张拉锚固体系中,当前采用较多的有:钢质锥形锚具和镦头锚具。前者从改进锚具性能,后者从改进下料与镦头着手,加强竞争力。对于大吨位钢丝束,DM型镦头锚具与XM型锚具都具有一定的竞争力。

在钢绞线束张拉锚固体系中,上海纺织建筑公司改进的JM_F型锚具(最大张拉力达1000kN)、中国建筑科学研究院研制的XM型锚具和QM型锚具(最大张拉力达5000kN)等,其性能指标均达到国际预应力协会(FIP)标准。当前,各生产厂正在稳定锚具质量和开发新品种上狠下功夫,竞争激烈。

为保证预应力锚具安全可靠,中国建筑科学研究院组织有关单位编制的锚具技术标准即将颁布。其主要特点是考虑到锚具的锚固性能受预应力钢材性能的影响,在计算锚具的效率系数时引入预应力筋的效率系数,以免把合格的锚具判为不合格或将不合格的判为合格。该标准将锚具分为二类:Ⅰ类锚具的性能指标符合国际标准,Ⅱ类锚具的性能指标略低于Ⅰ类锚具,使用范围受到限制。

2. 预应力施工工艺不断革新

后张法预应力筋的孔道留设,长期以来比较落后。自南京金陵饭店预应力屋盖引进镀锌双波纹金属软管(简称波纹管)留孔以后,在曲线束和密集的直线束中已逐步推广预埋波纹管法。目前,上海、重庆、大连、深圳等地金属软管厂生产的 $\phi 40 \sim \phi 100$ 波纹管,已大量供应。东南大学提出了波纹管合格性检验指标。

后张法预应力筋的张拉方法,近几年来,东南大学等单位在研究孔道摩擦损失与锚固损失的基础上,突破《钢筋混凝土工程施工及验收规范》(GBJ204-83)的规定,提出直线预应力筋一端张拉的长度可放宽;曲线预应力筋在弯起角度较小或锚固损失较大时可改为一端张拉,以简化工艺,提高经济效益。

后张法孔道灌浆,核工业部22公司结合秦山核电站安全壳,在竖向与环向灌浆方面做了大量的试验研究,在灌浆技术上有所突破,确保了竖向与环向孔道灌浆密实性。

无粘结预应力是一项新技术。无粘结束的制作有:涂套法、涂包法与挤压涂层法等。其中,北京市建筑工程研究所研制的挤压涂层工艺,机械化程度高,有一定的生产能力。

3. 预应力混凝土理论研究有很大进展

近十年来,我国在部分预应力混凝土、无粘结预应力混凝土和整体预应力板柱结构等方面理论研究都取得很大成绩,为提高预应力混凝土的设计水平和发展高效预应力混凝土结构起了重要作用。

部分预应力混凝土由于采用预应力与非预应力混合配筋,兼有全预应力与钢筋混凝土两者优点,既能较好地控制使用荷载作用下的裂缝宽度与挠度,破坏前又具有较高的延性与能量吸收能力。因此,具有很大的发展前途。中国土木工程学会组织有关单位编制的《部分预应力混凝土结构设计建议》,已正式出版。东南大学等单位对部分预应力混凝土的裂缝闭合性能、结构延性与优化设计等进行较深入的研究。中国建筑科学研究院与北京市建筑工程研究所等单位分别对无粘结部分预应力混凝土梁与板进行了系统的试验研究,为设计提供了依据。中建一局科研所等单位在吸收南斯拉夫整体预应力板柱结构的基础上创造性地进行了拼板的试验研究,扩大了柱网尺寸。

4. 预应力房屋结构在推广中创新

大跨度部分预应力混凝土现浇多层框架结构,自上海色织四厂建成六层双跨(20+20m)布机车间后,在多层工业厂房中,发展较为迅速。比较突出的有:南京水利科学研究院潮汐实验室30m屋面梁(柱距9m)、南京五台山综合训练馆35m楼面梁、合肥精毛纺织厂三层三跨(3×19.2m)框架、安徽纺织一厂顶层预应力柱等。目前,这类结构又向双向预应力发展,建成的工程有:安徽师范大学报告厅24×24m双向井式梁屋盖结构、上海农业大厦两层双向24×24m框架结构、闵行工人俱乐部三向网格梁(对角线27m)屋盖结构等。

无粘结预应力混凝土现浇平板结构在公共建筑中采用较多,发展也较快。比较典型的有:北京劳保用品公司大楼七层9×7m板柱结构,北京永安公寓七层7.2m板墙结构。最近,正在广州兴建的63层广东国际大厦是国际上采用无粘结平板最高的一座大楼。此外,无锡、兰州、天津等地井式梁升板结构,北京科技活动中心27×27m屋盖,无锡火车站二层26m框架,长沙贺龙体育场悬挑梁等,也都采用无粘结预应力结构。整体预应力装配式板柱结构有了发展。北京建筑设计院科研楼柱网为6.3×6.6m,采用三拼板,共计12层。北京工业大学食堂柱网为12×9m,采用九拼板,共计2层。国家专利局展厅采用六角柱网,由三角形肋板拼成。亚运会练习馆地下室顶板面积14530m²,是国内单层楼板面积最大的板柱结构。

预应力薄板叠合板结构在北京等地高层建筑中逐步推广,北京金融大厦单向薄板的跨度为8m,昆仑饭店首次采用双向预应力薄板。

最近建成的同济大学图书馆预应力混凝土悬挑结构(16层)与厦门国际金融大厦预应力混凝土水平折梁等,造型新颖,富有特色。

5. 预应力桥梁结构大量发展

预应力混凝土简支梁桥结构简单,造价较低,施工方便,在中等跨径梁中采用仍较多。郑州黄河公路桥的跨径为50m,共计70孔,是我国目前跨径最大、最长的简支桥梁。

预应力混凝土T形刚构桥前几年采用较多。重庆长江大桥主跨为174m,全长1073m,是我国目前跨径最大、最长的T形刚构桥。近年来为了减轻T形刚构桥自重,采用桁架式,其跨径达90m。

预应力混凝土连续梁桥具有跨越能力大,施工方法灵活,结构刚度大,抗震能力强,行车舒服,外型美观等优点,我国已逐步推广。柳州河东大桥($9 \times 60\text{m}$),采用多点顶推法。常德沅水大桥($84 + 3 \times 120 + 84\text{m}$),采用悬臂浇筑法。我国援建的伊拉克摩苏尔四号桥($44 + 10 \times 56 + 44\text{m}$),采用逐孔现浇法。广东容奇大桥($57 + 3 \times 90 + 57\text{m}$),采用预制吊装法,构件重500t。江门外海大桥($55 + 7 \times 110 + 55\text{m}$),采用预制构件悬臂拼装法,钢绞线束不进入腹板,施工方便,另外布置 $\Phi 32$ 钢筋,供预制件临时固定用。最近建成的广东洛溪大桥,全长1916m,主桥为四跨不等跨预应力混凝土连续刚构桥($65 + 125 + 180 + 110\text{m}$),主跨180m居东南亚首位,世界第六位,采用悬臂浇筑法施工。近年来,为了发展城市立交桥需要,还建成预应力连续弯梁桥有:青岛铁港码头立交桥($25 + 43 + 25\text{m}$)、北京东便门立交桥($25 + 3 \times 35 + 25\text{m}$)等。

预应力混凝土斜拉桥有较大的发展,铁路桥最大跨度为红水河桥(96m),公路桥的跨度日益增大,继济南黄河桥(220m)之后,天津新建的永和桥跨度达260m,居亚洲首位。最近发展的独塔斜拉桥有:广东九江大桥,悬臂160m,相当于跨径320m;重庆石门大桥,悬臂为200与230m。

6. 预应力特种结构的新发展

现代大型筒仓与储液池,采用绕丝机连续张拉,已难于满足要求。珠江水泥厂生熟料库首次采用大吨位钢绞线束,获得成功。目前正在施工的秦山核电站和大亚湾核电站的安全壳,其竖向、环向与穹顶都采用大吨位钢绞线空间束,施工难度较大。

预应力混凝土也开始用于电视塔。北京、天津与南京等地电视塔都采用预应力结构。正在施工的北京电视塔,高380m,目前是亚洲之冠。塔身采用竖向预应力,塔顶平台与基础采用环向预应力,反映了我国预应力混凝土高技术水平。

大吨位预应力拉杆已在葛洲坝和龙羊峡水电站大坝的大推力弧形门闸墩等工程中应用。预应力岩锚已在梅山水库、刘家峡水坝等基础加固,以及在龙羊峡水电站岩壁加固中应用,取得良好效果。预应力土锚在深基础垂直开挖中也已开始应用,如北京京城大厦、上海太平洋饭店等。

7. 预应力技术开发中存在的问题

发展高效预应力混凝土结构,节约钢材是我国基本建设中的一项基本政策。以往宣传不够并缺乏措施,广大的工程领导干部和技术人员在思想上没有引起足够的重视。

预应力结构的推广,设计是龙头。除少数设计人员对预应力比较熟悉,有创新外,多数设计人员对预应力结构仍难推开:一是对现代预应力结构不熟悉,又无规范遵循;二是忙于赶任务,对新技术不易吸收;三是搞新技术费劲,风险大,经济效益差。建设单位怕

造价高、工期长,施工单位怕难度大,也影响预应力结构的推广。

当前预应力钢材供应虽有好转,但供应渠道仍有脱节现象。锚具是预应力的命根,产品质量还不够稳定,缺乏严格的质量检验与监督制度。

近年来,我国预应力技术开发队伍不断成长,建立了多种形式的技术开发组织。多数以科研单位牵头,为缩短科研与生产的距离创造条件;但开发力量比较薄弱,难以满足形势发展的需要。

二、我国预应力混凝土技术的发展趋向

我国预应力混凝土技术的奋斗目标是什么,通过什么途径达到这一目标是大家比较关心的。本文在分析预应力技术发展现状和存在问题的基础上提出一些粗浅看法,抛砖引玉,共同为发展我国预应力事业努力。

1. 主要技术发展方向

1) 预应力钢材的发展趋势为高强度、粗直径、低松弛和耐腐蚀。各厂家应以提高强度为中心,将各项技术指标带上去。积极开发钢丝与钢绞线新品种,大力扶植精轧螺纹钢生产。90年代初,高强钢丝与钢绞线年产量争取达到20万吨。

2) 预应力张锚体系的发展趋势为大吨位、高效率 and 系列化。各厂家应在稳定产品质量的基础上,加强新品种开发。发展重点应为夹片式锚具和粘结式锚具及其配套设备;但要顾及历史条件,实行多种并存。九十年代初,我国主要锚具产品应赶上国际先进水平。

3) 预应力施工工艺的发展重点应为大吨位有粘结预应力成套工艺和小吨位无粘结预应力成套工艺。这两套工艺目前都有一定的基础。前者进一步需要解决配套用的穿束机与灌浆机等;后者进一步需要完善无粘结预应力筋生产线,发展商品供应。

4) 预应力房屋结构的发展重点应放在大跨度、大柱网、大开间多层与高层建筑上。根据国情,以发展现浇整体式为主,预制装配为辅。七五计划期间发展起来的预应力结构体系都应进一步探讨其适用条件,扬长避短,不断完善,赶超国际水平。积极开展多层工业厂房有粘结预应力混凝土框架结构体系和高层建筑无粘结预应力混凝土结构体系成套技术研究。预应力轻骨料混凝土结构在工程应用上应有所突破。

5) 预应力桥梁结构方面,由于考虑到T形刚构桥。如采用挂梁,则外形出现折线,不但影响外观,也妨碍行车。因此,发展重点应放在连续梁桥、连续刚构桥、斜拉桥等,创造出更多的新颖、经济、优美的桥梁形式。

6) 特种预应力结构具有广阔的发展前途。根据我国四化建设需要,应重点发展核电站预应力安全壳、大型预应力储仓与储液池、预应力地锚与预应力管桩等。

2. 进一步开发的措施

1) 加强技术开发队伍的建设。一是要健全与发展科研开发型预应力技术开发组织,加强技术成套能力与科学试验能力,正确处理科研与开发的关系、技术与经济的关系,研究出更多适用的成果,在行业中走在生产的前头,是预应力技术开发的骨干力量。二是在预应力开发任务较多的地区应建立生产经营型预应力技术开发组织,如预应力承包公司等,通过自身开发、技术引进或与科研开发型组织挂钩、联营等渠道,成为预应力技术开发的重要力量。三是要筹建从中央到地方学会一条线的预应力学组或技术咨询组织,对促进预应力技术开发起智囊作用。

2) 沟通预应力钢材的供应渠道。一是技术开发单位要沟通建设、设计、施工与厂家之间的信息,协助建设单位订货,并逐步过渡到由开发单位统一订货;二是呼吁金属材料公司每年向国外订购钢材时应减少普通钢筋订货,增加高强预应力钢材订货,因为钢材强度的增长比价格上升快,经济效果是合算的。同时有了高强预应力钢材,就可代换传统预应力构件所用的Ⅱ级钢筋,减少普通钢筋进口。

3) 编制预应力混凝土结构设计与施工规程。近几年来发展起来的房屋结构体系,如部分预应力现浇多层框架结构、无粘结预应力现浇平板结构、整体预应力装配式板柱结构、预应力薄板叠合板结构等都已鉴定,推广也不少,应及时组织人力编制设计与施工规程,使设计单位敢于设计,建设单位敢于采用,有利于开发。

4) 落实预应力技术开发的经济政策。根据我国经济体制改革的精神,新技术开发要在降低成本或提高使用性能的基础上取得经济效益。

对用高强钢材代替冷拉Ⅱ级钢筋的后张预应力构件,可按原预算计费(或直接按高强钢材及其工艺计费,但价格相当),钢材节约分成。这种做法,开发单位有20~25%利益,总包单位节约钢材并减少留孔灌浆、运输等费用,建设单位对工期与质量有了保障。

对现代预应力结构,可按建设项目投资包干,鼓励设计施工单位采用新技术,降低造价,节约分成;也可待施工图出来后按实际取费,华东预应力中心的收费标准可供参考。大跨度多层预应力结构比同类型小柱网结构的单价要增加5~10%,解决这一问题有二种途径:一是采用大跨度后,可增添设备,增加产值,综合经济效果好,但一次投资要增大;二是采用大跨度后,可减少厂房面积,结构造价就可持平,如考虑到楼(屋)面、围护结构、风管灯带等减少,还可降低总投资。对采用预应力新技术修改原有图纸,可按原预算计费,二次设计费与试验费在降低造价中开支,节约费由建设、总包与开发单位分成。东南大学开发部按此办法重新设计某厂预应力结构,节约投资30%,三方分成,比较满意。

5) 开展预应力技术交流与技术培训工作。学会与开发单位应起骨干作用。要有计划有步骤地开办技术讲座、培训班和研讨班,培养一批熟悉现代预应力技术的工程师和工人。此外,还应开展国际交流,通过来华展览、出国考察、技术引进、劳务出口或对外承包等渠道吸收国外有益经验,为我国预应力技术超过国际水平指明方向。

(东南大学 杨宗放)

预应力混凝土结构的未来

探讨公元2000年以后的预应力混凝土结构可能发生的变革，预测二、三十年后预应力混凝土结构的发展和在未来建设中的作用，这是一个难题。

但是，在回顾过去，分析现状、社会需求和发展趋势的基础上，展望并多少带有幻想性地预测未来，可启发人们去克服各种技术障碍，缩短由预测到付诸实施所需要的时间，促进人类社会物质文明建设的发展。因而是很有意义的。

—

预应力混凝土是通过机械或电热或化学方法对混凝土中的钢筋预先进行张拉，使结构或构件在受外荷载之前建立起内应力的混凝土。内应力的大小和分布应使能抵消该结构或构件在预定外荷载下所产生的应力至所预期的程度。预应力混凝土结构是使高强度钢材和高强度等级的混凝土能动地结合在一起的工程结构。尽管它在世界上的工程应用仅50年左右，但是，由于它特有的优点，使其发展很快，应用范围颇广，应用数量日益增长。过去，预应力混凝土主要用于建造单层或多层房屋、公路和铁路桥梁、油罐和水塔，并用于制造轨枕、电杆、桩、压力管道等方面。现在，已扩大到高层建筑、地下建筑、海洋工程、压力容器、安全壳、大吨位围船、电视塔以及地锚、基础工程等新领域。预应力混凝土结构是当前世界上最重要、最有发展前途的结构之一。在应用数量方面，美国70年代初期预应力混凝土年产量为 $10 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，苏联70年代末期的年产量达到了 $2.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。我国目前的年产量也已超过 $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

公元2000年之后，我国，同世界各国一样，将继续并更加广泛地使用预应力混凝土，用其建造各种工程结构。这是必然的。因为：

2000年，我国人口将增加到12亿，需要为新增人口提供6000万套住宅和相应的公共建筑。同时，要大量更新不能使用或改建不合那时标准的已有建筑物。采用预应力混凝土结构将有利于建筑高层化和大跨度建筑的顺利实现。

2000年，我国工农业生产值将翻两番，要求新建或改建、扩建大量工业建筑、农业建筑、铁路桥梁、能源工程结构以及储罐、料库等特种工程，而采用预应力混凝土结构是十分合适的。

2000年，人们的物质文化生活将有很大改善和提高，旅游事业将继续增长。这就促进公共建筑大量兴建；交通繁荣带来的是用于城乡运输的桥梁，轨枕和航空港建设的发展；更多更高的电视塔的建造等将使预应力混凝土结构发挥出更高的效能。

2000年，海洋开发预计将以从未有过的规模展开。预应力混凝土在未来的海洋开发事业中将成为最可靠的结构材料。

2000年，本世纪50、60年代大量建造的工程结构将要作维修和加固处理。预应力混凝土将发挥它应有的作用。

未来的建筑和其他结构工程将要求高强、轻质、抗震和耐火。预应力混凝土最能满足这些要求。因为它的一个主要优点就是可能消除结构中的永久裂缝，不必或很少需要维修，且结构寿命长，耐久性好。它的另一个主要优点是它是两种高强度材料的结合，因而强度高，在相同条件下比普通钢筋混凝土结构轻，加上大力采用轻质混凝土，将会使结构更轻，也将更有利于抗震。

另一方面，预应力混凝土结构是能够承担上述规模宏大的建设的大部分的。因为制作预应力混凝土的混凝土原料——砂、石、水泥基本上是取之不尽的，所需的钢材也很省，它不仅比钢结构省得多，而且也比普通钢筋混凝土省得多。

二

预应力混凝土结构在未来建筑及土木工程中的应用，将会有飞速的发展和变化。但是也可以肯定，它的发展过程带有很大的惯性，它不象化学和电器产品那样会因新技术的开发成功而立即改变面貌。所以，在短短的一、二十年间，它不会发生根本性的变化。因而可以对公元2000年后的预应力混凝土结构的发展和应用作出如下预测：

1. 居住建筑，在几十年内将继续向高层化发展，尤其是50层以下的高层居住建筑的比重将大大增加，6 m以上的不同跨度的预应力混凝土平板、楼板及轻型挂墙板将在各种高层建筑结构体系中得到极广泛的应用。

2. 2000年，预应力混凝土多层框架厂房、单层厂房和多层车库将趋向定型化、标准化。多功能的单层建筑的柱网尺寸将扩大到 $18 \times 18\text{m} \sim 30 \times 30\text{m}$ ，多层建筑主要采用 $9 \times 12\text{m} \sim 18 \times 24\text{m}$ 的柱网；单层厂房预应力混凝土构件将向大型化发展，宽度为 $2.4\text{m} \sim 3.0\text{m}$ 的双T板也将生产和应用。

3. 21世纪，大跨度公共建筑将大量兴建，并大量采用预应力混凝土框架，交叉梁体系、拱系及网壳结构以及预应力混凝土折板、薄板和悬索结构体系。跨度为50m的预应力混凝土折板结构，跨度为100m的预应力混凝土单层建筑以及直径为200m的预应力混凝土圆顶建筑也将可能成功地建造起来。

4. 在今后的几十年间，在长江、黄河等大江上将会继续建造几十座大桥。预应力混凝土桥梁将得到进一步发展和应用。跨度超过300m的斜拉桥也会在我国建成。

5. 特种结构工程中将越来越多地采用预应力混凝土结构。2000年，300m以上的预应力混凝土电视塔，直径为50~80m的料库和储罐，直径20~40m的压力容器和安全壳等结构工程将会建成并推广应用。

6. 预应力混凝土在未来的海洋开发事业中将发挥特别重要的作用。未来的人类必然要向海洋开辟从食物到各类原料的新资源和新能源。我国沿海也将对开发大陆架发生兴趣并寄予希望。未来的海洋构筑物将会不断涌现：海洋石油开采平台、海洋储罐和运输船等海洋能源开发设施将大量建造。由于预应力混凝土的耐久性、强度和经济性，很早就被认为是建造海洋结构的最好材料。因而到2000年，预应力混凝土结构将是海洋工程的最大支柱。

7. 预应力混凝土在今后水工建筑中将继续扩大应用。加固基岩和护坡工程中的预应力混凝土锚桩（地锚）以及大坝工程中的预应力混凝土闸墩等都将得到进一步发展。

8. 预应力混凝土还将为已建工程的修复和加固发挥独特的作用。

三

展望2000年,我国预应力混凝土结构的工程应用必将有很大发展,为达到本文中预测的进展和目标,以下几方面是应该十分重视和特别加以研究的:

1.混凝土应向高强、轻质、耐久、多功能方向发展。2000年,用于预应力混凝土结构的普通混凝土抗压强度应达 $50\sim 70\text{N/mm}^2$,轻质混凝土的容重在 1600kg/m^3 以下时,抗压强度应达 $30\sim 50\text{N/mm}^2$ 。

提高混凝土强度和延性的钢纤维和玻璃纤维混凝土,提高强度和耐久性的聚合物浸渍混凝土,人造轻骨料以及有利于增加混凝土强度、减轻混凝土重量、提高混凝土耐久性、方便混凝土施工等功能的各种外加剂都应重视和研究;理想的水泥品种及炉渣、碎玻璃废料和粉煤灰的利用也应重视。

2.预应力钢材应向高强度、大直径、低松弛和耐腐蚀的方向发展。建议多生产极限强度为 1900N/mm^2 、松弛损失不超过 $2\sim 3\%$ 的 $7\phi 5$ 钢绞线及 $\phi 7$ 、 $\phi 9$ 的高强钢丝,直径为 $\phi 16$ 以上的、极限强度为 1450N/mm^2 的调质热处理钢筋以及极限强度达 1100N/mm^2 的大直径精轧螺旋钢筋。

3.张拉锚固体体系要更新换代,研制大吨位和小吨位的张锚体系和设备。

4.提高预应力工艺水平,发展工业化生产,组织预应力专业化施工公司和队伍,提高生产效率和工程质量。研制完成预应力张拉工艺的机器人,实现计算机控制。

5.推广应用部分预应力混凝土结构,研究完善预应力混凝土的抗震性能和在抗震区的应用。

6.广泛探索预应力混凝土与钢筋混凝土的结合,预制与现浇的结合,预应力混凝土与纤维混凝土的结合以及与其它材料的结合。研究和发展预应力轻混凝土。

7.研究预应力混凝土、部分预应力混凝土结构的计算理论,完善计算方法,使大多数计算工作做到既能手算又能电算。注意预应力混凝土结构的优化设计、非线性分析和合理的配筋构造措施等。

8.研究预应力混凝土结构的拆除、重建方法以及预应力作为结构加固和调整内力的措施。

(东南大学 吕志涛)

第一章 钢材与张拉锚固体系

我国预应力混凝土用钢丝和钢绞线标准及其发展

预应力混凝土用钢丝（简称预应力钢丝）是用优质碳素钢盘条加热至 $850\sim 950^{\circ}\text{C}$ ，并经 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的铅浴淬火，然后经过酸洗冷拔而成的。预应力钢丝经过矫直回火后，可消除钢丝冷拔中产生的残余应力，提高钢丝的比例极限、屈服强度和弹性模量，并改善塑性；同时也可解决钢丝的伸直性，方便施工。预应力混凝土用钢绞线（简称预应力钢绞线）是在绞线机上以一根钢丝为中心，其余钢丝围绕其进行螺旋状绞合，再经低温回火处理而成的。

1956年，为满足我国第一个五年计划的需要，在天津钢厂，按照苏联国家标准《预应力钢筋混凝土结构的圆形碳素钢丝》ГОСТ 7348—55标准为依据，试制成预应力钢丝，水平较低。如直径5mm钢丝的抗拉强度仅 $1000\sim 1200\text{N/mm}^2$ 。1963年，为满足我国自行设计、施工的南京长江大桥引桥预应力混凝土梁的需要，参照《英国预应力钢筋混凝土结构用钢丝》BS2691—1963标准，又制成抗拉强度 $1570\sim 1760\text{N/mm}^2$ 的 $\phi 5$ 钢丝，这种钢丝的其他力学性能也达到当时苏联与英国标准的水平。在总结预应力钢丝与钢绞线试制与试用经验的基础上，1964年天津钢厂起草我国自己的《预应力混凝土结构用碳素钢丝》（YB255-64）标准，从1965年7月1日起发布实施。与此同时，还由天津起草发布的《预应力钢筋混凝土用钢绞线》（YB285-64）标准。

1984年天津钢厂从意大利 Redaelli 公司引进了低松弛预应力钢丝稳定化生产线，又制成低松弛预应力钢丝和镀锌预应力钢丝（1985年通过国家鉴定）。随后，新余钢铁厂又从意大利 Redaelli 公司引进一条低松弛预应力钢绞线生产线。

1985年，在总结预应力钢丝与钢绞线生产与推广经验的基础上，修改了1964年部颁标准，正式制定了预应力钢丝与钢绞线国家标准（GB5223—85，GB5224—85），见附表1与2。至此，在高强预应力钢材方面，我国已开始向国际先进水平迈进。

结合国外情况，我国预应力钢丝与钢绞线产品标准与技术的开发研究应做好以下工作。

一、提高抗拉强度

预应力钢丝（钢绞线）在构件中，是作为一种“张力元”给混凝土构件预施压力，钢丝（钢绞线）本身则处于受张拉状态。因此，其抗拉强度越高越好。不仅抗拉强度要求高，弹性极限也要求高。否则受力后易造成钢丝（钢绞线）的永久变形，无法起“张力元”的作用。钢丝（钢绞线）还须有一定的韧性，一般以伸长率或在规定钳口半径情况下钢丝的弯曲次数来表示。

要达到高强度和高韧性，除从钢丝生产工艺上通过控制热处理铅浴淬火温度及冷拉时保持一定总压缩率来完成以外，更有效的方法是通过化学成分来保证。

二、降低松弛损失

由于建筑与桥梁等土建工程使用年限都较长，并要求在预应力构件使用期间预应力始终保持一定值，要与构件共存亡。所以对预应力钢材质量和松弛性能要求很高。

英国BS 2691—1967标准技术条件规定，钢丝抗拉强度70%载荷，1000h应力损失：普通松弛级小于5%，低松弛级小于2%；钢丝抗拉强度80%载荷，1000h应力损失：普通松弛级小于8.5%，低松弛级小于3%。

目前对产生预应力松弛的原因还不清楚。国外有人认为“松弛”是金属“位错”运动的结果，限制“位错”可以使材料达到稳定化。当前国外对预应力松弛研究的情况是：

1. 千方百计降低“松弛”值，到目前为止，研究已有一定进展，但还没有出现完全不发生“松弛”的材料。

2. 通过短期测试，估计长时间可能发生“松弛”的程度，以便在设计构件时考虑进去，许多研究机构正投入大量资金从事这方面的研究，例如松弛试验要求在恒温、无震动条件下连续进行，连续记录，国外已进行了连续11年测定，摸索出变化规律。

1964年，英国索莫塞特公司(Somereet Co.)首先研制成功“稳定化处理”工艺。其原理是使钢丝在消除应力回火(350~400℃)的同时，承受一定程度的张力(一般为钢丝抗拉强度的30~50%)，钢丝在热张拉状态下产生微小应变(约0.9~1.3%)，从而使钢丝在恒应力下抵抗位错转移的能力得到提高，宏观上表现为钢丝的弹性极限显著提高，应力松弛率大大降低。这种工艺目前在美国、英国、日本、意大利、联邦德国等国家已被广泛采用，并列入标准。

三、开发大直径预应力钢材

在混凝土构件中施加预应力比较复杂，且锚具、张拉作业等费用较高。因此，减少锚具数量和施工张拉作业次数就可降低成本。此外，如要在悬索结构中减少钢丝成束根数，以及如水坝等设计孔道数量密集而受限制时，都需要大直径钢丝。所以，国外钢丝已向大直径发展，我国许多建工部门和水利部门也都提出这样的要求；而目前国内GB5223—85标准的最大直径为5mm，不适应我国建设的发展。意大利许多工厂出口的预应力钢丝直径7mm和9mm，在产品总量中，直径7mm约占50%，9mm占20%，5mm占30%。

1根钢绞线可以代替多根钢丝，而锚固1根钢绞线比锚固多根成束钢丝简单，又因钢绞线比成束钢丝握裹性能好，故欧洲各国多用钢绞线代替钢丝，美国使用钢绞线占70%，钢丝占30%，而且这个比例差将越来越大。

目前，我国预应力钢丝正由直径5mm向7mm发展，并将部分钢丝捻制成钢绞线，以满足发展的需要。

四、良好的伸直性

钢丝或钢绞线均要求有良好的伸直性，以便先张或后张施工，在美国ASTMA416—1980标准中，钢丝伸直性的要求是，取一段弦长60in(1524mm)的钢丝，中心处弯曲偏移(即最大自然矢高)应不大于3in(76mm)，它相等于直径不小于25ft(7620mm)的圆上弦与弧的关系。

我国钢丝伸直性按国家标准(GB5223—85)规定，取弦长为1m的钢丝，其弦与弧的最大自然矢高，光面钢丝不大于20mm，刻痕钢丝不大于30mm。

在英国BS5896—1980标准中，对钢绞线的伸直性要求是，取弦长为1m的钢绞线，

自由地放在一平面上，其最大矢高不得大于25mm（从弦的内表面计算）。

五、钢绞线不松散

为施工作业方便，钢绞线捻制时，国外许多工厂在绞线机上安有预变形器或后变形器，以消除钢丝残余变形。如用机械方法不能完全消除，在钢绞线稳定化处理张力回火后也可完全消除，保持钢绞线不松散，且平直，这在中国、美国、英国、日本等国家标准中都有要求，只是对检验松散的方法，目前尚无具体规定。一般是把绞线外层覆绕的钢丝解开后能复位，且不反弹者即算合格。

六、盘重大

国外以定尺长度供应钢绞线，标准规定一般按12000ft一卷供应，特殊情况可在订货时按要求定尺供应。目前国内以重量交货，特殊要求也可定尺或倍尺供应。

国内外钢丝订货一般仍以重量供应。国外盘重大，大约在300~600kg范围。国内因盘条原料盘重小，只有100~150kg，预计今年国内几套高速线材轧机陆续投产后，可供盘重1~2t的硬线盘条，钢丝盘重可以增大。

七、耐腐蚀

由于预应力钢丝强度高、塑性低，对腐蚀比普通钢筋敏感。如果在储存和运输过程中遭到雨淋、湿气或腐蚀介质的作用，则预应力钢材会发生电化学腐蚀，使钢丝表面形成大小不等弥散分布的腐蚀坑，腐蚀坑即相当于一个“缺口”。在受拉过程中，引起应力不均匀分布，且造成“缺口”边缘处应力集中。在平均应力较低时，“缺口”边缘应力已达到断裂应力，引起早期断裂。腐蚀所造成的“缺口”敏感效应与钢材的组织有关，在有较高含碳量及较高的残余应力时，会使“缺口”对应力更为敏感。由于预应力钢丝截面小，应力高，变形低，必须严防锈蚀。有严重锈斑或腐蚀的钢丝不得使用。

应力腐蚀是在钢材的拉应力与腐蚀介质共同作用下发生的。即拉应力使钢材的晶粒滑移，当有腐蚀介质时，晶粒之间的物质遭到破坏，从而使钢材产生晶间裂缝而发展成沿晶界的断裂。发生应力腐蚀断裂时，事先无明显预兆而突然断裂，危害较大。由于预应力高强钢材的低应变特性，它对应力腐蚀较为敏感。目前，应力腐蚀已成为衡量预应力钢材性能的一项重要指标而受到各国重视。

预应力钢丝表面镀锌是一种延缓钢丝腐蚀和应力腐蚀的有效方法。当镀锌钢丝表面存在有深达钢基的缺陷（如裂纹、划痕、切口等）或出现局部腐蚀坑（尤其是尖而深的坑）时，镀锌钢丝就会发生氢脆断裂现象。

对预应力钢丝和预应力钢绞线，制造厂应对表面防腐问题，例如工艺上的涂铜、磷化处理，以及日本工厂采用的黑化工艺着色等进行探索研究。现在，国外也提出冶炼成分中含铜可以防腐的科研设想。

八、钢绞线的发展

英国和日本还研究出“模拔成型”的预应力钢绞线。这种钢绞线就是捻制成型时通过模孔拉拔而成。这样，就使钢绞线中的每根钢丝在挤压接触时被压扁，从而大大减少了钢绞线的内部空隙和外径，提高了钢绞线的密度。这种钢绞线的外径小，在相同直径的孔道上，可使预应力筋的吨位增加约20%，同时，这种钢绞线与锚具的接触周边面积较大，易于锚固。

日本神钢钢绞线工业株式会社（SHINKO WIRE CO）为进一步增大钢绞线的