

P R E S T R E S S E D

预应力

高新结构技术 预应力度法

陈惠玲 著



中国环境科学出版社

前 言

国内外的工程实践充分证实了高效预应力混凝土能够节约钢材、水泥、能源、土地、延长使用寿命,并具有耐火、耐高压、耐腐蚀、抗疲劳、抗震等优点,是当代工程建设高新结构中一种重要的结构材料。

近 10 余年来,预应力混凝土的应用范围、推广数量、材料品种与生产工艺、计算理论等都有了许多新进展,特别是在高效预应力混凝土高新结构的设计原理上,改变了过去传统的概念,认为在全预应力和钢筋混凝土之间可以通过中、低预应力度的中间预应力度的有限预应力和部分预应力将两者联系起来。以方便设计不同预应力度的有粘结或无粘结预应力现代高新系列结构。

本书重点反映国内外近期预应力混凝土研究设计的新进展,并在综合我国和瑞士、英国、美国、印度、日本等现代预应力混凝土结构设计实践的基础上,进行归类作简要介绍,其内容包括预应力度的定义、计算,不同预应力度对结构性能的影响,如何应用“预应力度法”设计全预应力,有限预应力和部分预应力混凝土系列结构及实践;此外,还涉及现代预应力混凝土结构设计发展中的有关问题,如预应力混凝土梁的剪力与扭力设计、无粘结部分预应力梁的性能、预应力混凝土超静定结构和荷载平衡法计算以及交变周期荷载作用下部分预应力混凝土梁的性能等。书中也着重介绍林同炎(T. Y. LIN)和 G. S. 拉墨斯威密(G. S. RAMASWAMY)、巴赫曼(H. Bachmann)等学者的预应力混凝土结构设计的好经验。

全书承叶富葆同志仔细校阅。参加应用实例人员:陈惠玲、穆

祥纯、董乐民、李树昌、王振华、叶正宇、潘传霖、姚伟忠、沈晓红、冯永伟、江声述、马绍国及《高效预应力结构设计施工实例应用手册》中的有关人员。

本书中遇有不妥之处，恳切希望读者提出批评指正。

陈惠玲

2001年5月于北京
中国建筑科学研究院

内 容 提 要

本书介绍现代预应力混凝土高新结构技术简明快速技巧,即“预应力度法”以及近期国外预应力混凝土若干理论和实验研究的新成果。书中重点论述了预应力度及中低预应力度的限值预应力和部分预应力混凝土的概念、计算以及与之有关的预应力梁的剪力与扭力计算,无粘结部分预应力混凝土的计算,交变荷载作用下部分预应力梁的性能。此外,还介绍了预应力混凝土超静定结构及荷载平衡法等。书中附有现行与新编预应力结构设计规定的一些背景资料、高新结构工程实践、计算例题。本书可供从事现代建筑、桥梁、水工等土木工程的设计与施工、监理等技术人员以及专业院校师生、研究生等应用参考。

目 录

第一章 预应力混凝土的应用与发展概况	(1)
第二章 预应力度的计算	(11)
第一节 预应力度的提出	(11)
第二节 预应力度的定义及计算公式	(13)
第三节 不同预应力度计算表达式的分析比较	(17)
第四节 国际预应力协会(FIP)对预应力度的建议	(23)
第三章 按照预应力度对预应力混凝土结构的分类	(25)
第一节 预应力混凝土结构的分类	(25)
第二节 不同预应力度混凝土结构分类法的比较	(31)
第四章 预应力度对预应力混凝土结构性能的影响	(39)
第一节 预应力度对梁的挠度影响	(39)
第二节 预应力度对梁中预应力筋的应力与裂缝 变化影响	(41)
第三节 不同预应力度梁的极限弯矩和抗裂弯矩 变化	(45)
第四节 荷载变异对不同预应力度结构性能转换 的影响	(46)
第五章 预应力混凝土结构的极限状态设计	(50)
第一节 极限状态设计表达式	(51)
第二节 特征荷载	(51)
第三节 材料特征强度	(52)

第四节	分项安全系数	(53)
第五节	总安全系数	(55)
第六节	疲劳强度	(61)
第六章	部分预应力受弯构件设计的若干论点	(68)
第一节	选用简单有效的预应力度定义	(68)
第二节	设计方法允许连续过渡	(68)
第三节	截面受拉区应变	(72)
第四节	预应力度过高益处不大	(72)
第五节	部分预应力也可以允许永久的荷载	(72)
第六节	活荷重大时的预应力度取值	(73)
第七节	疲劳性能的估计	(74)
第八节	张拉控制应力及应力限值	(75)
第九节	非预应力筋的设置	(75)
第七章	部分预应力混凝土受弯构件的裂缝与挠度	
	分析	(78)
第一节	裂缝宽度计算方法	(78)
第二节	裂缝截面分析	(80)
第三节	例题	(83)
第四节	控制裂缝的其它方法	(89)
第五节	挠度	(92)
第八章	按“预应力度法”设计有限与部分预应力	
	混凝土高新结构	(94)
第一节	不同预应力度结构的过渡	(94)
第二节	有限预应力和部分预应力的优点	(95)
第三节	按“预应力度法”设计有限与部分预应力	
	混凝土高新结构	(97)
第四节	例题	(102)
第五节	部分预应力梁(扁梁)简化快速计算	(116)
第九章	预应力混凝土梁的剪力与扭力计算	(125)
第一节	区域的划分	(125)

第二节	V_{co} 的表达式	(126)
第三节	V_{cr} 的表达式	(127)
第四节	剪力钢筋的设计	(128)
第五节	对英国规范有关剪力条文看法	(130)
第六节	瑞士 SIA162 规范的规定	(131)
第七节	试验验证	(131)
第八节	其它有关剪力的建议	(135)
第九节	预应力混凝土的扭力	(139)
第十章	无粘结部分预应力混凝土梁的性能与计算	(143)
第一节	无粘结部分预应力梁的短期荷载性能	(143)
第二节	随时间变化的预应力损失	(149)
第十一章	在交变周期重复荷载作用下Ⅲ类部分预应力混凝土梁的低周性能	(155)
第一节	有粘结和无粘结部分预应力混凝土梁的低周性能	(155)
第二节	有粘结和无粘结部分预应力混凝土框架的低周性能	(164)
第三节	结论	(167)
第十二章	预应力混凝土超静定结构及荷载平衡法	(169)
第一节	压力线的概念	(170)
第二节	若干定义和定理	(171)
第三节	等效荷载的概念	(172)
第四节	荷载平衡法	(178)
第五节	荷载平衡法在板中的应用	(189)
第六节	荷载平衡法在薄壳中的应用	(190)
第七节	预应力度法及等效荷载计算部分预应力混凝土框架	(191)

第八节	综合等效荷载法计算部分预应力混凝土框架次弯矩·····	(204)
第十三章	“预应力度法”在预应力高新结构中的实践应用·····	(212)
第一节	在规范规程中的应用举例·····	(212)
第二节	在预应力高新结构中的实践应用·····	(214)
第十四章	设计方法的简评·····	(391)
第一节	“预应力度法”与“荷载平衡法”的计算分析简评·····	(391)
第二节	结束语·····	(400)
附录	高强钢丝、钢绞线的规格、品种与设计值·····	(402)
参考文献	·····	(405)

第一章 预应力混凝土的应用与发展概况

预应力混凝土自 1928 年法国学者弗莱西奈 (E. Freyssinet) 研究成功后, 经过数十年的实践与完善, 目前已成为一项专门的技术。使用该技术可扩大建筑与桥梁等结构物的跨度、降低楼层高度与增加层数、保证质量与安全, 是一种适应性强、综合性能好、陆地和海洋结构皆适用的结构技术。特别是在现代科学技术的许多部门中, 预应力混凝土结构已成为不可缺少的组成部分, 如核电站建设、海洋工程建设、高速公路与桥梁工程, 在某些高层建筑、工程抗震、高耸结构等要求采用预应力结构, 已成为其他材料不可代替的重要工程或设施。

近十余年来, 随着现代工业、交通运输和能源建设的发展, 国内外预应力混凝土也有了较大的变革。

在应用范围方面, 预应力混凝土不仅广泛应用于桥梁、建筑、轨枕、电杆、桩、压力管道、贮罐、水塔等, 而且也扩大到高层、高耸、大跨、重载与抗震结构、土木工程、能源工程、海洋工程、海洋运输等许多新的领域; 例如美国发展推广的后张法平板结构在新加坡 40 层办公楼中得到了应用。马来西亚预应力建筑高达 76 层, 泰国的无粘结预应力平板建造的 35 层、27 层、22 层的商场、办公、贸易用大楼及印度尼西亚雅加达的办公贸易大厦等。

美国芝加哥的一幢 50 层公寓, 采用了 7.9m 长、17.8cm 厚的预应力楼板。高跨比为 44.3。德克萨斯州的一幢 35 层的公寓建筑应用了预应力楼板, 并有 5.5m 的悬臂梁。美国建造了预制预应力现浇整体 4、5 层停车库, 分别可停车 900 及 700 余辆, 其预应力双 T 板的长度为 16.5m、18.3m。香港太平洋综合大厦的传递楼

板长度达 78.9m,最大宽度达 31m。

前联邦德国建造了预应力悬挂式的高层建筑,还建造了预应力悬索大跨空间结构,室内净空面积达 $270\text{m} \times 100\text{m}$ 。在南斯拉夫贝尔格莱德建造的大跨度飞机库中,其双坡预应力桁架的跨度达 135.8m。

在桥梁方面,国外最大跨径的简支梁桥是阿尔姆桥,跨径为 76m,最大跨径的 T 构是 270m 的巴拉圭来松森大桥,预应力连续梁桥的最大跨径是 92m 的瑞士摩塞尔大桥。英国用悬臂法施工的箱形桥梁跨度最大的达 240m;西班牙建成的预应力桥面板斜拉索桥,跨度达 440m。世界上最大跨度预应力连续刚构是 80 年代建成的澳大利亚的给脱威桥,主跨 260m。

在世界 20 多个国家内建造了 200 余座预应力斜拉桥,莱翁哈特教授称斜拉桥的发展是第二次世界大战以来的最新成就。目前世界上建造的最大跨径预应力斜拉桥是西班牙卢纳巴里奥桥,主跨 440m。最大的钢斜拉桥主跨为 856m 的法国诺曼底大桥。

在特种结构方面,如原子反应堆压力容器(PCRV),美国、前联邦德国已建造了高温气体炉,原子反应堆存储容器(PCCV)以美国及法国为中心已建造了 100 座以上。

加拿大建成贮存 120 000t 水泥烧结料后张预应力圆形筒仓,内仓 65.2m,地上高度 40m,地下深度 24m。加拿大建成了 553m 高的预应力混凝土电视塔。

法国建造 $120\ 000\text{m}^3$ 大型预应力液化气罐多个。

日本建造成 40 000t 水泥烧结料的双向预应力筒仓,外径 34.5m,高度 30.2m,厚度 0.47m。

还有池、罐等在各国内应用的很多,如德国博特罗普的废水处理工程中建造了世界最大的蛋形预应力混凝土污泥消化罐,高度 45m,中部直径 28m,顶部厚度 41cm,底部厚度 75cm,容积约 $15\ 000\text{m}^3$,罐壁水平、竖向均施加预应力。

此外,印尼还有预应力巨型货船,石油开采平台也采用了预应力混凝土。

挪威于北海水深 216m 处建造了格尔法克斯(Gullfakse)C 型采油平台,油灌底部面积有 16 000m²,总高度 262m,在油罐壁、底板、环梁与裙壁板均水平施加预应力,在管桩与罐壁中采用竖向预加应力,这是世界上最大的混凝土平台。

在预应力高强混凝土管桩方面(简称 PHC 桩),日本采用量很大,其用量占整个基础用桩量的 80% 以上,美国、德国、意大利、前苏联以及东南亚地区也已大量发展和生产使用。

美国后张预应力管桩,直径为 0.914 ~ 2.389m,壁厚 12.7 ~ 17.78cm,管段长 4.88m,采用 C70 混凝土。

预应力管桩,前苏联最大管径达 5m,管长 6 ~ 12m,壁厚为 8 ~ 14cm。

管桩为方桩混凝土用量的 70%,省钢 30% ~ 50%,价格为钢桩的 1/3。

预应力基础应用也有新的发展,在新加坡 71 层旅馆的建筑中,后张法预应力筏基得到了应用。

我国预应力混凝土也有不少新的应用与发展,在房屋建筑中,我国应用预应力建造了不少多层和高层建筑,并在工业民用建筑中的大跨度、大柱网及承重荷载中得到推广,其结构有现浇后张预应力(有粘结或无粘结)和预制先张预应力两大类。

建筑中预制现浇整体预应力结构,常用的预应力预制构件有:12 ~ 18m 的屋面大梁,18 ~ 61m 的屋架和 6 ~ 12m 的槽形屋面板,6 ~ 12m 的吊车梁,6 ~ 33m 的 T 形板和 6 ~ 18m 双 T 板,V 形折板用于燕山石化公司库房的跨度为 27m,无粘结预应力筋混合普通钢筋配筋的 V 形折板跨度达 30m,国内应用的最大为 36m,马鞍形壳板最大跨度为 27m,预应力空心板多为 3.3 ~ 7.5m。近年来还应用了挤压法生产的 9 ~ 18m 的多孔板,高跨比达到了 1/45。此外,还有先张及后张预应力的檩条,跨度为 4 ~ 12m,起重量 200t 的 12m 吊车梁,在电站建设中采用的吊车梁跨度为 7.8m,起重量为 400t。

在广大城镇建设中,40 余年来大量采用了冷拔低碳钢丝先张

法预应力中、小型构件,这是70年代我院笔者等研究发展并获得全国科学大会奖励的一项预应力结构实用技术。鉴于这项技术材源广、上马快、易于掌握、价格便宜,在全国各地建厂近达2万多家,年产预应力小构件超1500万 m^3 ,普遍应用推广,其推广量约占房屋预应力混凝土总量的80%以上。这不仅解决了国家城乡大量建房应用木材的困难,与钢筋混凝土相比,还节约了钢材1/3以上。每年以用冷拔低碳钢丝54万~75万t计算,年节约钢材量,则超过18万t~25万t。这项预应力科学技术已转化为生产力,产生了显著的经济效益与社会效益。近年来还同时推广应用冷轧带肋钢筋及预应力螺旋肋中强、高强钢丝预应力板、梁等多品种构件。

此外,在多层、高层的抗震建筑中,应用了单向及双向有粘结预应力楼板与叠合连续板、梁结构,薄板的长度为7~8m。这种预制现浇整体预应力建筑在外交公寓、新建的小区建设、中国银行、昆仑饭店、西苑饭店以及武汉、长沙等高层建筑中广泛采用。

现浇后张有粘结与无粘结单向、双向预应力超静定结构建筑也得到了推广,如部分预应力框架结构在工业、民用建筑中已推广800余万 m^2 ,最高应用到21层,最大跨度为40m,最大柱网为18m \times 18m,无粘结预应力T形板、平板、升板、板柱结构,均用于办公楼、仓库、展厅、厂房、体育建筑及高层建筑中,目前应用的板跨多为7~12m,高跨比为1/25~1/45,及16m \times 25m。建成的最高建筑为63层。近期,我们还将无粘结预应力创新地应用于工业建筑的多层多跨框架结构中,当应用于宽扁梁时,其高跨比还可达1/30。在公共和工业建筑中,应用了有夹层、无夹层的无粘结预应力的井式网格梁板结构。最大跨度为27m \times 27m。后张竖向预应力及预制后张整体预应力也在民用建筑中应用和发展。前者建成了6层、18层的大开间高层建筑,并扩大到预应力砌块建筑之中。预应力板柱结构用于住宅、宾馆、办公楼与厂房、仓库等,公共建筑的最高修建达16层。另高层建筑转换层(梁、厚板、桁架)亦多采用了预应力结构。

预应力大悬臂结构除用于中央电视塔塔座悬挑结构外,在高层图书馆的悬挑结构、体育建筑看台大悬挑、悬挑大雨篷等均有应用。山西国际大厦大悬臂达 10.18m,厦门国际机场大悬臂达 11m。此外在电影院、娱乐城、高层办公楼、多层厂房中,也较多地应用了大悬臂结构。

近期又建成了厦门太古机库预应力结构长达 160m、首都国际机场新航站楼(27 万 m^2)、停车楼、航华综合楼、外交部新楼、建材集团金隅大厦、电教中心、天津劝业场新楼、百货大楼、南京新华大厦、北京东方广场、世纪坛建筑、杭州黄龙体育中心、以及湖南、湖北、浙江、山西、山东、福建等 200 多个有粘结、无粘结预应力工程。

在桥梁方面,近十余年来,我国钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁建设有了很大的发展,技术水平也有显著提高。无粘结预应力也已在北京紫竹立交桥,河北温塘河大桥、湖南的石龟山澧水大桥以及 30m 孔心板桥中应用。

我国预应力简支梁最大跨径的浙江飞云江大桥,最大跨度为 62m 的 T 型桥梁,预应力高强钢丝配筋,吊重 217t。

预应力 T 型刚构,便于悬臂施工,维护费用少、造价低,我国最大跨径的重庆长江大桥是 174m。

兴建完毕的由涪水散花镇至黄石市的黄石长江公路大桥,全桥总长 2580.08m,其中主桥长 1060m(162.5 + 3 × 245 + 162.5),为 5 跨单箱单室的三向预应力混凝土连续刚构桥,也是国内主跨 245m 跨度最大的连续刚构桥。

预应力连续梁具有整体性好、刚度大、抗震力强等优点。近 10 余年来修建了哈尔滨松花江桥、包头黄河桥、广东九江大桥(引桥 50m 为国内最大顶推跨径)、湖北沙洋桥主跨 111m、常德沅水桥主跨 122m、广东的惠州大桥主跨 124m。

目前,云南奴江桥是预应力连续梁,最大主跨为 154m。贵州的剑河桥与花鱼洞桥均为桁架式组合拱桥,主跨 150m,都进入世界同类桥梁跨度的前列。

在预应力斜拉桥方面,我国起建于 70 年代的四川云阳桥,跨

径 75.84m。现已建成的铜陵长江公路大桥 432m,是亚洲第二大双索面斜拉桥。上海杨浦大桥主跨达 602m,具世界第二最大跨度。

汕头海湾大桥主跨为大跨度悬索桥,中孔跨度 452m。还有跨度 270m 的虎门桥连续刚构。

这些斜拉桥与悬索桥的建成标志着我国预应力斜拉桥等达到了世界先进水平。

此外,随着高等级公路的各地兴起及城市立交桥的建造,近 10 余年来弯坡斜桥等不规则桥的增长很快,预应力混凝土弯箱梁等也建造很成功。

城市立交桥、高架桥近几年在北京、辽宁、江苏、大连、南京、青岛、成都、上海等地一座座的架立,便道口为通途。

北京立交桥数量之多,规模之大,在全国首屈一指,在世界大城市中也不多见。城市轻轨高架桥也正在上海、北京兴建成功。

预应力混凝土铁路桥梁,早在 50 年代中期研制成功了预应力混凝土铁路桥梁,并逐步转入批量生产和实践应用。至今工厂先张法生产的 16m 及后张生产的 24m、32m 预制预应力混凝土梁近两万余孔,目前预制梁的跨度达到 40m、洛阳黄河桥为 50m。九江长江大桥应用的 40m 预应力箱形梁重达 260t。此外在红水河铁路桥梁中还应用了斜拉桥,主跨为 96m。近年建成的 168m 攀枝花支线连续刚构,南昆铁路的 90m、高 100m 的清水河大桥连续刚构,西盘江大桥 V 形撑连续跨度 90m,都是具有国际水平的铁路桥梁。

钱塘江第二大桥是公路与铁路两用,总长分别为 1792.8m 和 2861.4m。铁路引桥采用了 32m 多孔预应力混凝土连续梁,梁体采用三向预应力,其连续长度堪称世界之最。

在预应力混凝土轨枕方面,我国 50 年代中期研制成功后,60 年代开始生产和应用目前在全国铁路上已铺设预应力混凝土轨枕超过了 1 亿根,年平均 400 万根,近年达 600~800 万根以上,共节约了木材超过 1200 万 m^3 ,并改善了轨道运营状态。目前还发展应用了 C60 等级的预应力高强混凝土轨枕,并采用了 $\phi 5 \sim \phi 7$ 螺旋肋高强钢丝及 3 $\phi 4(\phi 8.7)$ 3 股钢绞线,进一步改善其受力特征。

在铁路工程建设中,我国 50 年代中期已在第一节电气化铁路中使用了预应力工字型截面接触网支柱,近年来在重载铁路大秦线工程中应用了环形截面支柱,这种支柱双向受力匀称、性能优越,可推广使用,混凝土为 C50、C80 级。

在特种结构工程中已建有电视塔、水池、筒仓以及圆形、方形清水池与消化池、蛋形污水处理池与核电站压力容器等。在电视塔建设方面,已建成了北京、天津、南京预应力电视塔等,上海建的预应力电视塔超过了 450m 高度。球形水塔容积达 2500m^3 ,压力容器已在秦山、大亚湾核电站中应用。还有蛋形消化池,容积 10536m^3 ,池高 44.5m,地下埋深 15m,最大直径 24m。济南采用的为有粘结后张预应力蛋形池、浙江采用的为无粘结后张预应力蛋形池。

此外,70 年代工厂大批量生产了先张法预应力 $\phi 550$ 和 $\phi 400\text{m}$ 的离心管桩,工地生产不同直径的大直径管桩,最大直径为 3.6m,混凝土 C50 级,近年可达 C70 级,目前管桩年产量超过 20 万 m。

在预应力桩方面,我国还应用了先张法生产的长达 52m 截面为 $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的预应力方桩、广泛应用的冷拔低碳钢丝预应力内圆外方桩以及大孔径直径达 1.2m 的后张预应力的钢绞线长桩,并且用于宁波北仑港和连云港等港口工程中;后张预应力桩亦用于上海的高层建筑软土地基中。

近年来我国南方还生产应用了 $\phi 300 \sim \phi 500\text{mm}$ 预应力高强混凝土管桩 (PHC 桩),其混凝土强度为 C80,有效预压应力 $\geq 4.91\text{MPa}$ 。近 3 年来符合国际和日本 JESA5337 - 1987 标准生产近 50 万 m 的管桩,不仅用于国内的工业与民用高层建筑,还用于桥梁、码头、基础等。此外,也销往港、澳等地,受到了海内外用户的欢迎。

预应力还在基础及连续墙和岩、地锚中成功的应用,是在北京、江苏、浙江等地先后应用过无粘结预应力筋的筏式基础与有粘结预应力的板式基础,应用至今性能良好。

利用预应力锚束进行加固,已用于修建 50 多年的丰满水电站

混凝土重力坝,坝顶高 90.5m;在 60 年代也加固了梅山水电站的岩基,70 年代还用于双牌水电站岩基的加固,80~90 年代广泛应用于葛州坝、龙洋峡、刘家峡等加固岩基与锚拉洞,预应力土锚用于高层建筑开挖基础时的护坡,与边坡稳定,如北京京城大厦、穆斯林大厦、新东安市场、故宫地下室档案馆与上海、沈阳等地深基工程、云南漫湾水电站边坡治理等。目前在北京中银大厦等深基坑 24m 的地下连续墙锚杆支护中采用了无粘结预应力可折式锚杆。

用无粘结预应力技术加大了山东胜利炼油石油催化装置的基础,使在不停产、连创效益的情况下,实现了基础加固。

大港炼油厂年产 80 万 t 常压蒸馏装置塔的大型基础,采用了无粘结预应力筏式基础,简化施工工艺。

此外,山西、宁夏等地 50~60m 大跨度的钢栈桥、体育馆建筑的索结构、电力用索网塔架、网架结构及网架框架的 140~160m 拉杆等也均采用了预应力结构。在预应力网架结构中无粘结预应力拉杆长达 160m 为世界之最。

黄河小浪底引水压力洞($\phi 5000\text{mm}$ 、壁厚 500mm),于 1986 年由中国建筑科学研究院与黄河水利委员会设计院国内首先采用后张法无粘结预应力环段进行试验,并用游动紧缩式环形锚具,仅在一个缺口内预加应力,并经内部加压的环向受力试验研究首次获得成功。为靖江隔河岩水利枢纽 $\phi 9500$ 、壁厚 750mm 的预应力引水压力洞及小浪底排沙洞、广东的东深供水香港的输水洞等提供了依据和应用,也为小浪底工程应用各种压力洞提供了基础,双圈无粘结筋已在小浪底压力洞中应用成功。

预应力渡槽也有应用和发展,如 27.3m、37.4m 空腹桁架渡槽,东深供水预应力 U 形渡槽及涵管等与钢筋混凝土相比可省钢 35.9%,减少混凝土用量 25.3%,减轻自重 26%。北京郊区延庆还使用了新型的预应力斜拉渡槽。

输送 3.5 万 kV 以下低压电的预应力电杆及 11~22 万 V 高压预应力电杆塔等均广泛得到了应用,50 万 V 超高压预应力杆塔进

人试用阶段,大量的预应力电杆及轨枕还利用了螺旋肋高强钢丝或三支钢绞线作为配筋进一步节约了钢材。

预应力混凝土压力管最大直径用到 3.0m,还普遍生产应用自应力水管;近来 2m ~ 4.8m 直径的无粘结预应力压力管也试制成功。

预应力筒仓的筒壁、斗壁也均采用无粘结预应力,目前最大筒仓容量为 3 万 t。

在预应力钢材和混凝土方面,目前国外预应力筋主要应用低松弛的 $\phi 5 \sim \phi 7$ 钢丝和 $\phi 12 \sim \phi 15$ 直径的钢绞线(0.5 ~ 0.6 吋),其松弛数值约为一般应力消除预应力筋的 25% ~ 35%;还应用有精轧大螺旋粗钢筋。常用的普通混凝土最高强度可达 $90\text{N}/\text{mm}^2$;轻骨料混凝土也在预应力工程中得到应用。我国在预应力混凝土中,普通采用高强与中强的钢丝及高强低松弛钢绞线以及热处理钢筋和一部分 $\phi 25$ 和 $\phi 32\text{mm}$ 精轧大螺旋粗钢筋等。预制构件混凝土强度达 $80\text{N}/\text{mm}^2$,试制成功达 $120\text{N}/\text{mm}^2$,轻混凝土的强度达 $40\text{N}/\text{mm}^2$ 以上。

在预应力混凝土生产工艺和张拉设备方面亦有不少进展,国内外均有各自的预应力体系和配套机具系列。国外常用单根和多组钢绞线锚具以及钢丝镦头锚具,最大能力可达 10000kN 。我国在预应力工艺方面亦有不同的方法并具有自己的特点。如有长线张拉、机械和后张法张拉,并有与各类锚夹具配套的相应设备,如切筋器、挤压机、压花机、拉伸机、冷镦机、穿束机、测力器等。在预应力筋束型和锚固方面,发展配套的单根和多根钢绞线预应力体系,如有张拉锚固 15mm 钢绞线的锚夹具与前卡式千斤顶,还有斜夹片或直夹片的 XM、QM、OVM、HVM、QHV、QXM 型 1 ~ 55 型锚具及其配套千斤顶,如 YC-18、YC-23、YCD 与 YCQ、YCW 等型千斤顶等。钢丝镦头锚固体系的张拉设备最大能力达 5000kN 。

在预应力混凝土设计原理方面,近十余年来发生了巨大的变化,首先统一了预应力混凝土和钢筋混凝土不是两种截然不同材料的看法,并认为介于全预应力和钢筋混凝土之间的结构只有按