

# 预应力技术的创新与应用

冯大斌

(中国建筑科学研究院 北京 100013)

**摘要:**介绍了预应力技术的发展状况,阐述了预应力技术的应用范围与典型工程,以及预应力的创新应用领域。

**关键词:**预应力混凝土 预应力技术 创新 应用

## 1. 从预应力混凝土到预应力技术

### 1.1 预应力混凝土技术

混凝土结构是我国乃至全世界广泛使用的土木工程结构,目前我国年使用混凝土十五亿立方米以上,混凝土中年使用普通钢筋约六千万吨,年使用高强预应力筋约一百万吨。混凝土结构分为素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、型钢或钢管混凝土结构(组合混凝土结构)和钢—混凝土混合结构。素混凝土结构只配少量钢筋或根本不配钢筋,主要用于受压构件。钢筋混凝土结构是将受拉能力强的钢筋和受压能力强的混凝土组合后形成的一种同时承受拉压应力的优秀结构材料,广泛应用于各类土木工程结构,其缺点是钢筋强度受到限制,一般来说在钢筋混凝土结构中钢筋标准强度不应超过500MPa,否则若要充分发挥作用会产生较大变形或裂缝,另一个缺点是当其跨度、长度、平面尺寸或承载较大时,会产生不可恢复的较大裂缝或较大变形,从而影响结构性能或正常使用性能。而预应力混凝土则不同,它是将高强钢筋和高强混凝土“主动”结合而形成的新一代优秀结构材料,它能充分发挥高强钢筋和高强混凝土的全部性能,且能按照结构工程师要求在混凝土中建立预期的应力或变形状态,以抵抗外荷载的作用,即它既能节约材料、节省资源,又能改善和提高结构性能,解决钢筋混凝土结构的裂缝问题和变形问题,因而在土木工程界得到广泛应用。组合结构或混合结构则是由钢—混凝土共同组成的材料,更多地利用了钢的拉压性能,钢材

用量指标较高,结构性能较好,在大型工程中具有较强竞争力。因此可以说预应力混凝土是一种极为优秀的结构材料,是一种先进的结构混凝土技术。

### 1.2 预应力技术

预应力混凝土技术起源于上世纪二十年代,发展于二次世界大战后的资源短缺年代,因为它能利用高强钢筋可节省材料。在我国上世纪五、六十年代正是由于材料紧缺而开发了预应力混凝土技术,形成了我国的预制预应力混凝土梁、屋架、空心楼板等。上世纪八十年代后,随着我国预应力混凝土材料、工艺、设备和结构技术的发展,预应力混凝土技术得到更广泛应用,技术水平不断提高,应用领域进一步扩大。大家知道,预应力混凝土主要是通过张拉钢筋并将张拉的力量锚固传递给混凝土而实现的,这个原理以及为实现这个原理而研究开发的各种张拉锚固工艺技术目前在其它结构、材料和施工工艺中得到进一步应用。如钢结构可以施加预应力,砖石结构、岩石、土壤均可施加预应力;预加应力的工艺有先张法、后张法,后张法又可分为有粘结和无粘结后张工艺,近几年又开发出缓粘结后张工艺和体外束后张工艺;预加应力不仅可用于抵消荷载产生的应力,还可用于抵消动力作用应力、温度应力、收缩应力和各种应变、变形;张拉及锚固工艺可用于重物的水平牵引或顶推旋转、垂直提升,用于大型工程结构的节段拼装等。因此可以说预应力混凝土技术已经从单一的结构材料技术发展成为具有结构材料功能、结构设

计手段和特殊工艺方法的综合技术——预应力技术。

## 2. 预应力混凝土技术的应用

预应力混凝土技术由于它既能节约材料又能改善和提高混凝土结构性能,因而在土木工程界得到广泛应用。

### 2.1 低层大跨度房屋结构

这类建筑主要是商业建筑、工业建筑、物流仓储建筑、航站楼类建筑、会展建筑、文化体育建筑等,这类建筑的特点是需大跨度、大空间或承受重荷载,用普通混凝土结构建造不经济或根本不能实现,代表性工程见下例。

(1) 双向大柱网建筑 一般要求柱网在 $8 \times 8\text{m}$ 至 $12 \times 12\text{m}$ ,采用预应力无梁楼盖结构或预应力梁板结构,结构高度对无梁楼盖结构在 $1/40 \sim 1/50L$ ;对梁板结构中的梁可取为 $1/18 \sim 1/25L$ ,对板可取为 $1/45 \sim 1/55L$ 。此类结构的优点是建筑空间大、功能布置灵活,结构占用层高尺寸小,结构构件性能好,抗裂度可控制,楼板挠度小,钢材用量省,模板与钢筋施工速度快,质量易保证。典型工程有:首都国际机场新航站楼,建筑面积33万平米,柱网 $9 \times 9\text{m}$ , $12 \times 12\text{m}$ ,采用无粘结预应力无梁楼盖结构,首层顶板厚250mm,地下室顶板厚300mm;珠海机场候机楼,柱网 $12 \times 12\text{m}$ ,建筑面积9万平米,采用预应力框架大平板结构,框架梁高600~650mm,框架梁间采用 $12 \times 12\text{m}$ 的无粘结预应力平板,板厚220~230mm;北京松下电子部品厂房,采用 $10 \times 10\text{m}$ 预应力框架结构;东莞康佳影视生产基地工业厂房,建筑面积15万平米,采用 $12 \times 12\text{m}$ 双向有粘结预应力框架主梁和无粘结预应力次梁结构。

(2) 双向超大柱网建筑 一般要求柱网在 $15 \times 15\text{m}$ 至 $30 \times 30\text{m}$ 。采用双向受力框架结构或采用预应力主次梁结构,采用双向受力体系时,结构高度可取 $1/18 \sim 1/25L$ ,采用主次梁结构体系时,主梁结构高度可取 $1/15 \sim 1/20L$ ,次梁结构高度可取 $1/20 \sim 1/28L$ 。此类结构不施加预应力很难实现或很不合理。典型工程有:深圳车港,

建筑面积12万平米,柱网 $25 \times 16\text{m}$ ,采用有粘结预应力框架主次梁结构,沿16m方向主梁高1200mm,跨高比 $1/14$ ,沿25m方向次梁高1000mm,跨高比 $1/25$ ;沈阳机场候机楼,柱网达 $24 \times 18\text{m}$ ,采用预应力框架结构;首都机场停车楼,柱网为 $9 \times 18\text{m}$ 、 $18 \times 18\text{m}$ ,采用有粘结预应力框架主次梁结构;南京国际展览中心,采用 $27 \times 27\text{m}$ 柱网;青岛山东会展中心,采用 $27 \times 36\text{m}$ 柱网。

(3) 单向大跨度建筑 一般为工业厂房、体育建筑或公共建筑,跨度在12~36m,柱距为6~9m,采用单向预应力框架或单向预应力密肋梁结构,框架梁结构高度可取 $1/15 \sim 1/25L$ ,单向密肋梁结构高度可取 $1/25 \sim 1/30L$ 。典型工程有:北京北新建材塑钢车间厂房,跨度 $2 \times 27\text{m}$ ,有粘结预应力框架梁高1600~1750mm;北京地铁四惠车辆段检修库,跨度 $27+24+24\text{m}$ ,柱距6m,有粘结预应力框架梁高1.75m,其上有50cm覆土。此类建筑一般楼面采用预应力框架,屋面采用轻钢结构。

### 2.2 高层建筑结构楼盖

这类建筑主要是写字楼、商住楼、住宅及一些电信、电力大楼等,其特点是需大空间、承受重荷载,同时建筑师或业主希望在保证使用净空的条件下尽量降低层高,也就是希望有最小的结构高度,其代表性工程如下:

(1) 外框内筒或筒中筒结构高层建筑 一般外框架或外筒与内筒的跨度在8~12m左右,楼盖采用平板或扁梁跨越,外框用边圈梁形成整体,平板型楼板跨高比采用 $1/40 \sim 1/50$ ,扁梁楼盖中扁梁跨高比采用 $1/20 \sim 1/28$ 。典型工程有:广东国际大厦,63层筒中筒结构写字楼,楼面为无粘结预应力平板,板跨7.0~9.4m,板厚220mm,该工程是国内层数最多的预应力结构;青岛中银大厦,58层筒中筒结构写字楼,楼面为无粘结预应力扇形单向板,板跨8.1~9.83m,板厚230mm,此工程是国内最高的预应力房屋结构,总高度241m;济南长途电信枢纽工程,27层筒中筒预应力平板结构,内外筒间跨度12m,板厚跨中270mm,支座450mm;新上海国

际大厦, 38层外框内筒预应力框架扁梁楼盖结构, 外框与内筒间跨度12m, 预应力框架扁梁高450mm。此类建筑采用预应力技术的优点是以最小的结构高度跨越大跨度, 在8~12m跨范围内平均可节省楼层结构高度200~400mm, 在同样使用净空条件下, 可降低建筑层高约300mm, 在限高100m的情况下, 可比普通混凝土结构增加两个楼层面积, 从而显著降低造价。

(2) 框架剪力墙结构或板柱剪力墙结构 框架剪力墙结构中框架的柱网在 $7.5 \times 7.5\text{m}$ 以上, 采用预应力框架扁梁大平板结构体系, 扁梁高300mm以上, 框架梁间大平板采用无粘结预应力平板或夹芯板, 板厚150mm以上。板柱剪力墙结构由于受抗震规范限制, 在高层建筑中较少采用。典型工程有: 深圳华民大厦柱网 $7.8\text{m}$ , 北京吉庆里18号楼柱网 $8.0 \times 7.8\text{m}$ , 北京京都商业中心九号楼柱网 $8.5 \times 7.5\text{m}$ , 均为框架剪力墙结构, 采用无粘结预应力框架梁板结构或有粘结预应力框架梁板(扁梁)结构。框架剪力墙结构高层建筑, 当框架柱网达10m以上时, 底层柱轴力较大, 应采取专门措施减少柱尺寸。

(3) 剪力墙结构高层建筑 剪力墙开间在6.9m以上, 楼面采用无粘结预应力平板, 跨高比采用 $1/45 \sim 1/55$ , 可实现大开间住宅灵活隔断, 楼板刚度、抗裂性显著优于普通混凝土结构。典型工程有: 深圳山东大厦, 24层剪力墙预应力大平板结构公寓, 开间 $7.8\text{m}$ , 板厚160mm; 深圳即达大厦、万达大厦等多幢30层左右的高层剪力墙结构住宅采用了大开间预应力平板楼盖技术。

### 2.3 房屋建筑中的特种构件

在房屋建筑中许多关键结构构件采用预应力技术, 如高层建筑中的巨型转换板采用预应力技术分阶段承担上部结构的荷载, 或减少厚板中的普通钢筋用量, 高层建筑中的巨型转换梁也是如此。有些建筑中的大型悬挑构件也必须采用预应力技术来建造, 其它如大跨度的异形板, 报告厅顶板也需使用预应力技术。典型工程有: 杭州新城站综合楼巨型预应力框架转换梁, 跨度33m, 托转上面4层楼面; 中华世纪

坛主坛体下环形预应力板, 跨度14.5m, 板厚350mm; 新上海国际大厦四个角部挑出的观景区, 预应力悬挑梁出长度达7.5m; 深圳会展中心上部结构的预应力悬臂梁挑出长度达15m。

### 2.4 特种工程结构

特种工程结构是预应力混凝土技术应用的重要领域, 在筒仓、水池、水管、安全壳等环形或球形结构中, 预应力混凝土技术是其重要的实现手段, 因为这类结构中存在较大的拉应力, 普通混凝土结构建造不能满足抗裂要求及耐久性指标, 可以说这些结构必须采用预应力混凝土技术。典型工程有天津大港预应力煤仓, 广东珠江水泥厂水泥生料、熟料仓, 秦山核电站、田湾核电站预应力混凝土安全壳, 杭州四堡无粘结预应力蛋形污水消化池等。

高耸塔桅结构也是预应力混凝土技术的重要应用场所, 为提高塔桅结构的抗震抗风能力, 预应力混凝土技术被广泛用于中央电视塔、天津电视塔、上海电视塔等超高混凝土塔身中。

### 2.5 桥梁工程结构

混凝土桥梁工程是预应力混凝土技术应用的主战场, 几乎所有二十米跨以上的混凝土桥梁都必须采用预应力技术。简支预应力混凝土桥梁我国达到的最大跨度是浙江瑞安桥的62m, 郑州、开封黄河大桥均采用了大量50m跨预应力混凝土简支梁, 南京长江二桥北汊桥的预应力混凝土连续梁跨度达到165m, 重庆长江大桥的预应力混凝土T形刚构单边悬挑长度达87m, 跨度达174m, 广东珠江虎门辅航道桥预应力混凝土连续刚构跨度达270m。北京的二环、三环、四环、五环、六环及城市铁路高架桥都采用了各种类型的预应力混凝土桥梁技术。

## 3. 预应力技术的创新应用

### 3.1 房屋建筑中使用部位的扩展

预应力技术除用于实现大跨度楼盖结构外, 还可用于基础底板形成预应力筏板基础或预应力梁板基础, 以承担巨大的基础反力; 用于地下室外墙承担水压力、土压力产生的侧向荷载; 用于偏心受压柱、拉杆、吊杆、抗浮桩等构件; 用于屋面结构形成刚性防水层等。典

型工程有首都国际机场新航站楼、停车楼等。

### 3.2 房屋建筑中使用功能的增加

通常预应力技术被用于抵抗荷载产生的拉应力,但它也可用于抵抗温度、收缩、变形等产生的应力,有时甚至预应力技术是为了保证结构的整体性提高刚度。典型工程有北京现代城SOHO二期、三期,预应力技术用于大面积超长地下室顶板,以抵抗温度、收缩应力等。浙江黄龙体育中心主体育场外环梁连续长度781m,采用预应力技术抵抗荷载、温度、收缩等作用产生的应力。

### 3.3 房屋建筑中应用于不同的结构材料

预应力技术源自预应力混凝土技术,它是为发挥混凝土结构的优势而开发的,但它的原理同样适于砌体结构、钢结构、组合结构、木结构等。特别是大跨钢结构、组合结构目前采用预应力技术成为一种趋势,预应力技术既可调整大跨钢结构杆件的内力又能控制其变形。典型工程有山西化肥厂大跨度预应力钢栈桥,下弦采用钢绞线拉索提供中间支撑以控制整体结构的变形。上海浦东机场航站楼、广州会展中心、哈尔滨会展中心等工程的屋盖结构采用了预应力张弦梁结构,跨度达到126m。浙江黄龙体育场采用预应力拉索悬吊的空间钢结构,实现看台雨篷无柱悬挑五十米。

### 3.4 预制先张与现浇后张组合运用

大跨度大面积多层建筑楼盖,为降低成本加快施工速度,采用预制先张法制作楼板,现浇后张法制作框架,形成楼盖,具有较强的竞争力。典型工程有山东高密纺织厂厂房,采用27m跨现浇预应力框架,9m跨预制先张SP板;北京昌平拉斐特城堡,采用22m跨现浇预应力框架,6m跨先张预制夹芯板,均取得良好效益。

### 3.5 预制先张与钢结构的组合运用

钢结构由于施工速度快,造价便宜,在单层厂房结构中具有较强的竞争力,但当用于多层房屋时,由于楼板造价高而缺乏竞争力,采用预制预应力混凝土楼板可提高多层钢结构的竞争力。

### 3.6 桥梁工程中与施工技术的结合

大跨桥梁结构本身离不开预应力技术,同

样大跨桥梁的施工建造也离不开预应力技术,在目前先进的无支架桥梁施工技术中,悬臂拼装(或浇注)必须充分依靠预应力技术,顶推施工、牵引节段、提升节段也是充分利用预应力技术,预制节段拼装施工更是完全依靠预应力技术。典型工程有:湖北黄石长江公路大桥,3×245m跨预应力混凝土连续刚构桥,采用悬臂浇注法施工;上海沪闵路高架桥,分别采用大型预制钢节段整跨牵引降落施工以及采用小型预制混凝土节段高空拼装施工;北京五环路石景山桥,采用钢绞线牵引转体施工,该桥重14000吨;五环路京九铁路桥采用顶推施工,桥重14000吨。

### 3.7 其它工程领域的创新应用

水利工程中预应力技术可用于大坝加固、水库周边山体加固、船闸闸壁加固、闸门闸墩锚固等,也可用于建造大直径有压输水管、渡槽,大直径泄洪、排砂、发电用管道等。

海洋工程结构是预应力技术应用的一个重要领域,因为预应力混凝土具有良好的耐久性,其耐海水侵蚀的能力优于普通混凝土结构和钢结构,它可用于近海工程结构,制作预应力混凝土码头、栈桥、近海平台、海上机场、堤岸等;也可用于海上工程结构,制作浮船、码头、浮桥、隧道、浮式平台、浮式巨型容器、采油平台、海上储运站等。

地面构筑物如道路路面、赛车跑道、飞机跑道等有高速交通工具运行的地方,为增加耐久性,减少伸缩缝,提高路面质量可施加预应力。地下工程结构,为提高抗渗性能、抗裂性能,增加耐久性可施加预应力。

预应力技术用于工程结构的托换、加固和改造是一种极为合理的手法,因为预应力技术可以让托换或加固的结构与原结构共同受力或主动分担原结构的荷载。

### 3.8 与其它技术的综合应用

预应力技术是一项极为灵活、实用的结构技术、材料技术和施工技术,但为充分发挥预应力技术的效应,应提倡预应力技术与其它工程结构、材料、工艺技术综合应用,以解决各种工程技术难题。