

# 方圆大厦主体结构预应力设计

于治磐 赵公华 刘湛 吴占军 张大航 孙宝光

(沈阳现代预应力工程有限公司 沈阳 110001)

**摘要:**方圆大厦是一座具有超凡的建筑构思和奇异外观造型的标志性建筑,复杂的结构体系和众多设计施工难题,给设计和施工同时带来了挑战,也同时带来了创新的机遇。大跨度预应力转换桁架,预应力自平衡受拉梁柱体系都是本工程的设计及施工难点,本工程在预应力结构设计的概念和施工技术进行大胆探索和创新,取得了宝贵的经验和成果。使建筑的寓意与建筑结构功能取得了有机统一。

**关键词:**预应力转换桁架 斜腹杆 预应力吊柱 自平衡受拉梁柱体系 斜拉杆

## 1 工程概况

方圆大厦位于沈阳市惠工广场及新北站附近的东南角黄金地段。建筑学由台湾李祖原建筑事务所主持设计,辽宁某设计院配合结构设计。沈阳现代预应力工程有限公司负责预应力专项设计及施工。本工程总建筑面积52000m<sup>2</sup>,地上22层,地下2层,总建筑高度99.750m,基本柱网尺寸8.4×9.0m,层高为一层5.3m,其它各层4.2m。地下室分别设置空调机房、变配电所、热交换站、车库等。地面以上设银行、商务、办公等使用功能。由于建筑物功能定性为金融、商业贸易的高端办公楼,因此外轮廓造型构思取材于古代的铜制钱币。为形成立面上“钱币”的中空效果,在第11~17层间拔掉两根柱,形成了25.2×25.2m的正方形“钱眼”。为营造自然采光的四季共享大厅,地上1~5层入口25.2m×13.6m范围内采用挑空形式。为形成建筑物外轮廓的圆形,在第10层利用预应力自平衡受拉梁与受拉斜杆共同支撑远端弧形柱承托各层挑梁。建筑立面实景效果见图1。

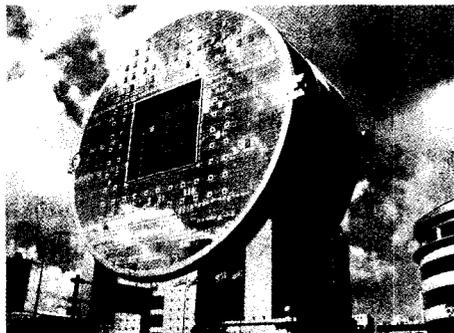


图1 建筑立面实景效果

注:《方圆大厦》项目获第二届欧维姆预应力技术奖三等奖。

## 2 预应力转换桁架设计

本工程新颖奇特的建筑外观,复杂多变的建筑功能决定了很多楼层必须采用预应力结构方案才能解决,尤其是标高80.900~85.100m的大跨度(25.200m)转换桁架,更是本工程中非常棘手的结构难题,这直接关系到建筑方案能否真正实现,具体设计难点及处理方法如下:

(1) 由于工程招投标期间,负责结构专业的设计院在预应力转换桁架问题上还没有成熟的结构方案,因此,预应力专项设计及施工未能顾及,待我公司设计人员介入后,发现原预应力转换桁架方案受力极不合理。原方案中20至21层共两个彼此对称的斜腹杆,左侧的斜腹杆下端为⑤轴线与标高80.900m汇交,斜向上交于④轴线的标高85.100m处节点;右侧的斜腹杆下端为⑥轴线与标高80.900m汇交,斜向上交于⑦轴线的标高85.100m处节点;见图2。

(2) 根据中国建筑科学研究院高层建筑技术开发部编制的TBSA《多层及高层结构三维空间分析软件》,在荷载作用下,两个斜腹杆(XZ-1)均为偏心受拉构件, $N_x=12613.4kN$ , $M_{yx}=M_{yy}=370.6kN\cdot m$ ,按《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)第3.2.2条,该预应力转换桁架安全等级应为一级,结构构件重要性系数 $\gamma_0=1.1$ ,构件配筋用计算拉力为 $N_{max}=1.1N_x=1.1\times 12613.4=13874.74kN$ ,配筋率 $\rho>4.0\%$ ,超过规范的最大配筋率限值,导致截面为900×900斜腹杆尺寸满足不了规范要求,桁架变形也很大。另外,斜腹杆(XZ-1)下端处楼板大部分中空,可用于传递水平力的外部楼板宽度只有3.95m,在

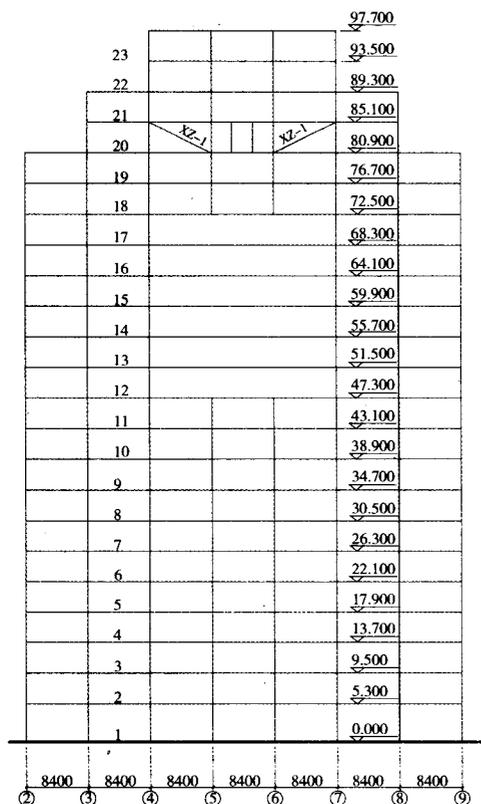


图2 预应力桁架原布置方案

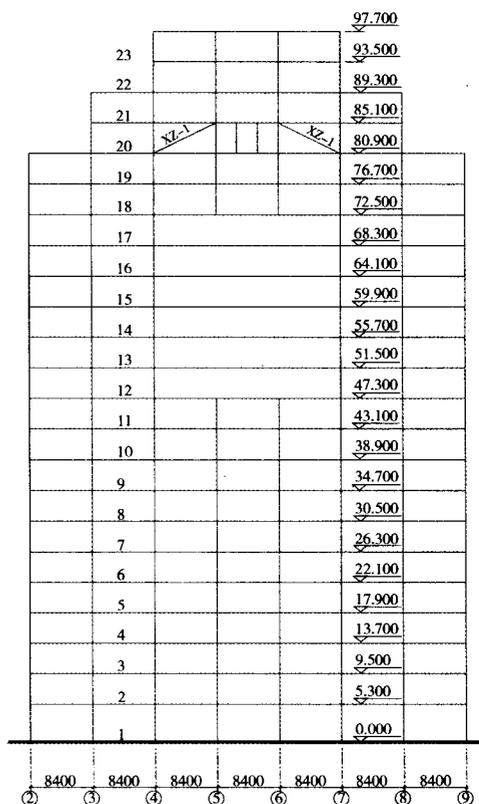


图3 预应力桁架修改后布置方案

风载或地震等水平力作用下,斜腹杆出平面必产生弯矩,这样,在双向弯矩及拉力作用下的拉弯受力状态使斜腹杆受力很不合理。因此,我公司设计人员通过与台湾李祖原建筑师事务所的工程师协商,把斜腹杆布置形式改为如图3所示受力状态,受力形式由偏心受拉构件转变为偏心受压构件,传力明确,选型合理,承载能力大大提高,同时斜腹杆截面也由 $900 \times 900$ 降为 $750 \times 900$ 。

(3) 预应力转换桁架方案调整合理后,准确的受力模型建立和内力计算是十分重要的。依据TBSA《多层及高层结构三维空间分析软件》计算分析,在荷载作用下,两个斜腹杆(XZ-1,  $750 \times 900$ )均为偏心受压构件,内力值如下:

$$N_x = -8900.2 \text{ kN}, M_{xx} = 73.0 \text{ kN} \cdot \text{m}, M_{yx} = 409.7 \text{ kN} \cdot \text{m};$$

$$N_y = -12984.1 \text{ kN}, M_{xy} = 68.0 \text{ kN} \cdot \text{m}, M_{yy} = 537.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

混凝土预应力桁架混凝土强度等级为C70的细石混凝土,混凝土强度设计值为 $f_c = 33.8 \text{ N/mm}^2$ ,轴压比为 $\mu_N = 0.57 < 0.7$ ,配筋见图4。

(4) 标高 $72.500 \sim 85.100 \text{ m}$ 间的预应力混凝土吊柱(DZ-1,  $900 \times 900$ )受力形式为拉弯构件,若按普通钢筋配置,配筋率已达到 $\rho = 3.66\%$ ,裂缝宽度超过 $0.3 \text{ mm}$ ,如此重要构件无论从承载力上,还是变形及耐久性上都是不妥的,因此,必须施加预应力。在荷载作用下,两个吊柱内力值如下:

$$N_x = 3685.6 \text{ kN}, M_{xx} = 289.4 \text{ kN} \cdot \text{m}, M_{yx} = 2470.5 \text{ kN} \cdot \text{m};$$

$$N_y = 3685.6 \text{ kN}, M_{xy} = 289.4 \text{ kN} \cdot \text{m}, M_{yy} = 2470.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

配筋见图4。

由于DZ-1采用的是有粘结预应力技术,孔道内灌浆是保证钢绞线与混凝土之间的握裹力及钢绞线耐久性的关键环节,因此,对孔道灌浆的质量必须高度重视,具体从以下几个方面进行控制:

1) 灌浆材料:

水泥浆:应有足够的流动性,水灰比为 $0.4 \sim 0.45$ 时,流动度为 $150 \sim 200 \text{ mm}$ ,可以满足灌浆要求。水泥浆3h泌水率宜控制在 $2\%$ ,最大不超过

3%，水泥浆强度等级不应低于M30级。

外加剂：为提高水泥浆的流动性，减少泌水和体积收缩，在水泥浆中掺入10%~12%的JP型外加剂，当水灰比为0.35~0.4时，其流动度达到240mm以上，泌水性3h小于2%，体积微膨胀，强度指标极好。

### 2) 水泥浆的搅拌：

首先把水加入搅拌机，再加入水泥和外加剂，材料计量应以水泥重量50kg的整数倍计算水量和外加剂用量。

搅拌时间应保证水泥浆混合均匀，一般需要2~3min，灌浆过程中，水泥浆的搅拌应不间断，当灌浆过程短暂停顿时，应以水泥浆在搅拌机和灌浆机内循环流动。

### 3) 灌浆：

为保证灌浆的密实性，采用自下向上的灌浆方式，即从标高71.750m的柱底作为注浆孔，直到标高87.250m处出浓浆后，再逐一封闭出浆孔，继续加压至0.5~0.6MPa，封闭进浆孔截门，待水泥浆凝固后，再拆卸连接接头，及时清理。

(5) 转换桁架由于多杆汇交，且钢筋多而密集，施工难度很大。为确保工程质量，设计人员对钢筋下料及弯折锚固等做了大量放样工作，保证混凝土能够与钢筋很好握裹，确保了该构件的设计安全度。

斜腹杆XZ-2与预应力桁架的上弦杆在节点处汇交，斜腹杆的钢筋应综合考虑上弦杆的有粘结预应力钢绞线的位置，钢筋就不能按常规的等距排列方式，必须在满足规范最大间距的前提下定位布置，具体布筋方式见图4。

在设计理念中，处处体现了设计与施工一体化的宗旨，钢绞线的位置、普通钢筋的锚固、灌浆孔的留设、施工工艺的先后顺序，在设计图纸中都有详细的表达，见图4、5。力求设计图纸在施工现场能够完美体现，从源头上为工程进度和施工质量提供可靠保证。

## 3 预应力自平衡受拉梁柱体系

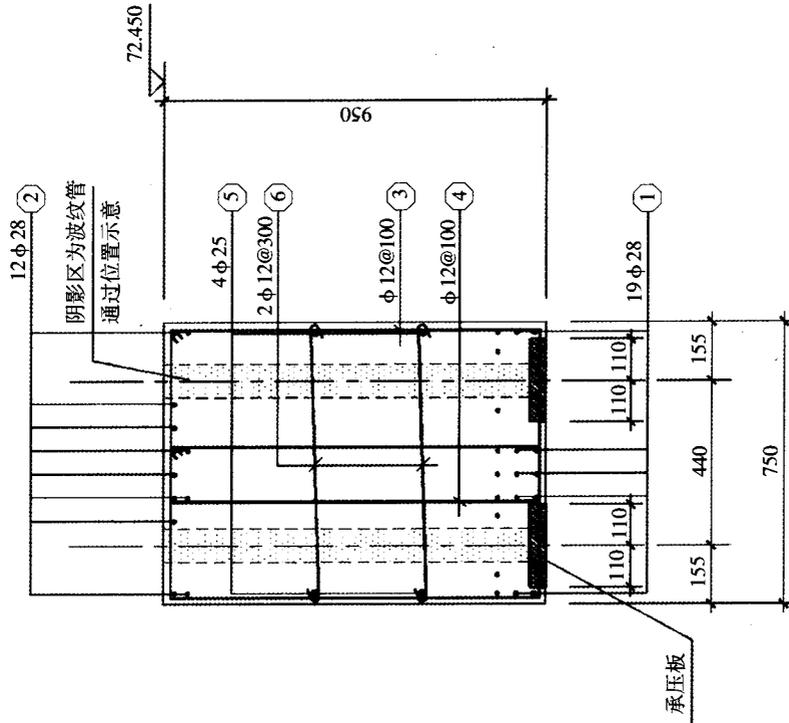
本工程项目名称是“方圆大厦”，如果说，预应力转换桁架实现了其中的“方”，那么，预应力自平衡受拉梁柱体系则实现了建筑物外轮廓的“圆”。轴线②⑨上的圆弧柱通过

标高38.850m（第10层）的悬臂梁端承受3100kN的集中力，该悬臂梁悬挑长度为3.6m，如果仅靠悬臂梁来承托如此大的集中荷载，无论从承载力上还是刚度变形上计算都很难实现。为此，在梁端设置斜向预应力拉杆，斜拉杆截面尺寸800×800，构件内布置四个集团束有粘结预应力低松弛钢绞线，每个集团束内设置6根公称直径15.2的钢绞线，把集中力传至标高43.050m（第11层）处的①④轴线柱节点上，这种传力方式，势必使标高43.050m（第11层）轴线②⑨上的框架梁中产生很大的拉力，为平衡此拉力，在该层框架梁布置两个集团束有粘结预应力低松弛钢绞线，每个集团束内设置12根公称直径15.2的钢绞线。这样，很好地平衡掉了框架梁内的拉应力，保证了梁的极限承载力和变形能力。从而由悬臂梁、斜拉杆、框架梁构成了受力合理的自平衡体系，很好地实现了“钱币”造型的圆弧轮廓造型。也构成了本工程一大创新和亮点。如图6所示。该方案构件尺寸纤细轻巧，抗震性能极大提高，最大限度地满足建筑使用功能。

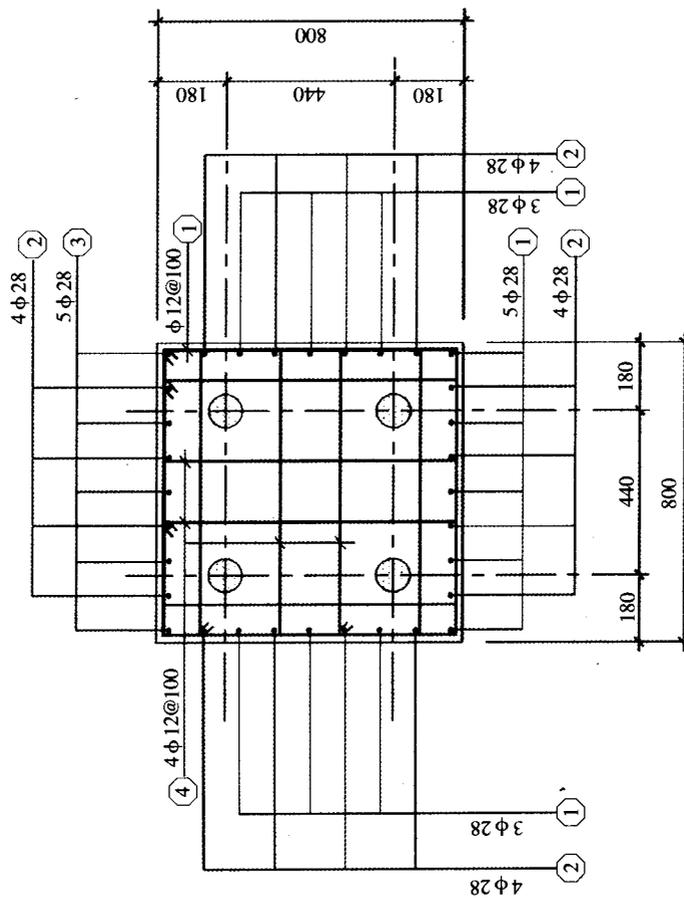
(1) 预应力斜拉杆在与标高43.050m（第11层）轴线②⑨上的框架梁节点处为五杆汇交，并且有三向杆件中既有普通钢筋又有预应力钢绞线，过于密集的钢筋使混凝土的粗骨料很难下去，节点区极易造成空洞，或局部区域只有水泥浆液而无粗骨料的现象，而斜向杆预应力钢绞线的固定端也锚固于此，一旦节点区混凝土不密实，预应力钢绞线提供的3125kN的压力极易把核心区混凝土压碎。为此，该自平衡体系及相关联部位均采用强度等级为C80的细石混凝土，节点区钢筋布置及锚固均现场实际放样，钢绞线的布置按图示要求严格定位，固定端的网片钢筋在保证纵筋的前提下插空放置。混凝土的振捣严格按区域逐一振捣，既不过振也不漏镇，确保节点区混凝土的密实性。

(2) 预应力自平衡受拉梁柱体系同预应力转换桁架一样，采用的是有粘结预应力技术，孔道内灌浆是保证钢绞线与混凝土之间的握裹力及钢绞线耐久性的关键环节，因此，对孔道灌浆的质量必须高度重视。具体的控制方面与预应力桁架相同。





标高72.500米层(A)轴线上  
④~⑦间梁钢筋布置图



2a-2a

图5 钢筋布置图



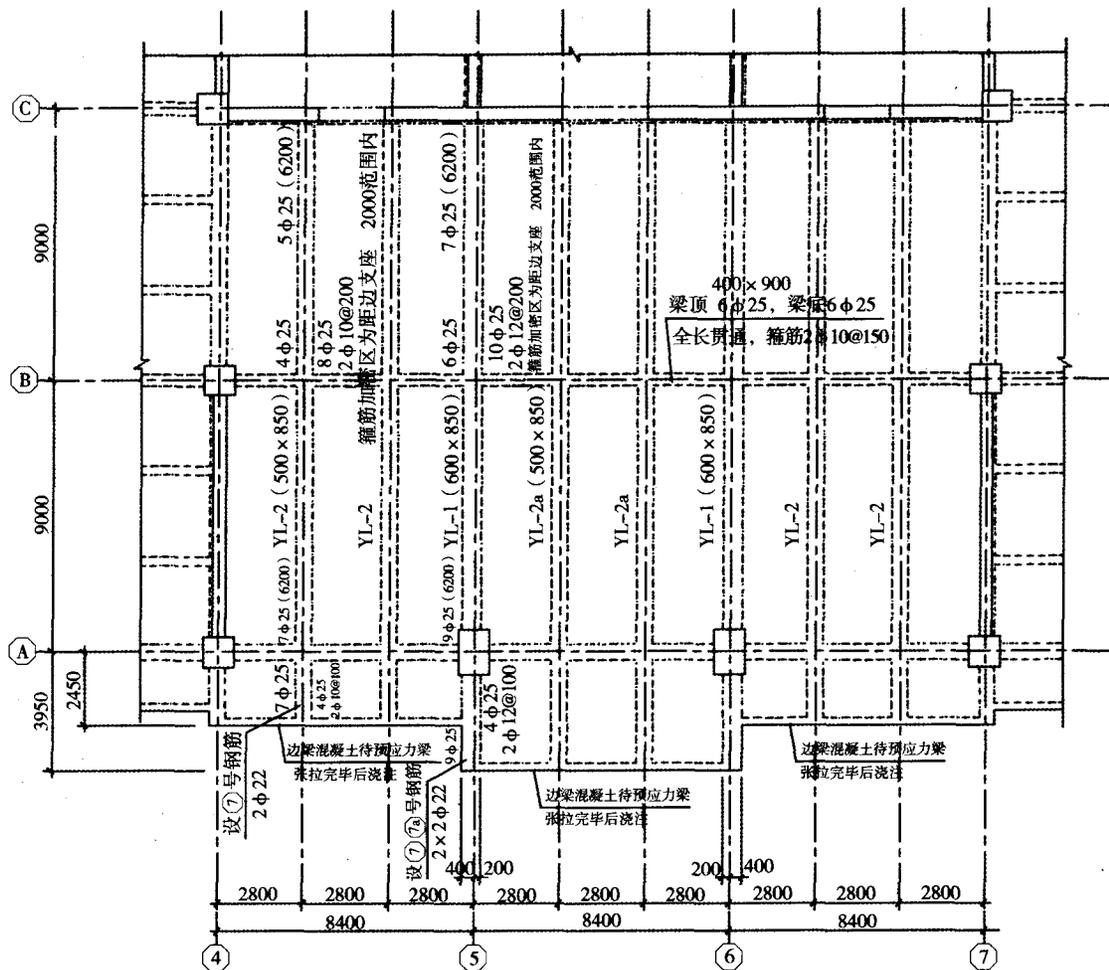


图7 标高22.100m层预应力梁平面布置及非预应力钢筋配置图

#### 4 高效预应力大跨梁

建筑功能要求,在第5至11层、第17至18层营造18.0×25.2m宽敞通透的共享大厅,因此,采用了大跨度预应力梁可以最大限度的提高了建筑净空,使建筑在视觉上绝无压抑感。预应力框架梁跨度为18.0m,截面尺寸600×850,预应力次梁跨度为18.0m,截面尺寸500×850,具体设计参数及其构造见图7。

#### 5 工程设计小结

本工程设计具有鲜明的特点,可概括为(1)超凡的建筑构思和奇异的外观造型;(2)复杂的结构体系和众多设计施工难题。由于建筑功能复杂,造型设计独特新颖,给结构设计带来很大难度,尤其是表现在预应力设计及施工方面难度更为突出,促使本工程在预应力结构设计的概念和施工技术进行大胆探索和创新,取得了宝

贵的经验和成果。确保建筑的寓意与建筑结构功能的构成有机统一。总之,本工程作为沈阳市的标志性建筑,其建筑功能与外观造型的有机结合,预应力技术起到了决定性的作用。确保了建筑使用功能及各项经济技术指标,完美实现设计构想。

本工程现已成为沈阳市重要的标志性建筑,也是沈阳市唯一在世界上获奖的建筑工程。

#### 参考文献

- [1] 陶学康,后张预应力混凝土设计手册,中国建筑工业出版社,1996年11月
- [2] 陈惠玲,高效预应力结构设计施工,中国建筑工业出版社,1998年6月
- [3] 美国后张预应力混凝土学会著,华东预应力混凝土技术开发中心译,后张预应力混凝土手册,东南大学出版社,1989年10月
- [4] 杨宗放,方先和,现代预应力混凝土施工,中国建筑工业出版社,1993年6月