

文章编号: 1671-6833(2005)01-0024-04

# 大跨预应力混凝土楼盖结构选型研究

童丽萍, 王彦超

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 大跨预应力混凝土楼盖结构形式多种多样, 不同的楼盖结构, 需要选择不同受力性能的结构形式. 以郑州国际会展中心展览部分大跨预应力混凝土楼盖为研究对象, 分别讨论了主次梁结构、次梁承重结构以及井字梁结构 3 种结构形式 5 种不同的结构布置方式, 并对其进行了分析计算. 针对各结构布置方案的受力特点, 通过对 5 种不同布置方式的预应力筋用量、结构内力以及变形的分析, 结果表明, 对于此类双向跨度相差不大的结构, 井字梁方案较优. 该结论为正确选择结构布置方案, 优化楼盖结构方案提供依据.

**关键词:** 预应力混凝土; 大跨度楼盖; 受力性能

**中图分类号:** TU 528.01 **文献标识码:** A

## 0 引言

近年来, 随着使用功能以及生产工艺要求的不断提高, 对大空间的要求越来越普遍. 大跨楼盖结构可以提供较大的使用空间, 适用于多功能大厅、会议厅、展览馆等建筑需求. 现代结构材料(尤其是高强度低松弛钢绞线)和结构设计理论与电算技术的发展, 使得预应力混凝土结构建成超长跨结构成为可能. 预应力的使用可以改变结构内力以及应力的分布, 尽可能地利用高强混凝土的受压和高强低松弛钢材的受拉性能, 使材料的潜能得到充分利用. 预应力大跨混凝土楼盖结构内力很大, 合理的结构布置以及预应力的合理应用对于实现大空间来说至关重要, 它可以改善结构的受力性能, 提高结构的安全和经济性能. 目前预应力混凝土楼盖常采用的结构形式有主次梁承重、次梁承重和井字梁结构等结构布置形式.

作者以郑州国际会展中心展览大厅下部混凝土楼盖结构为工程实例<sup>[1]</sup>, 在柱网不变的情况下, 对其超长跨预应力混凝土楼盖结构进行了 3 种方案 5 种不同方式的结构布置, 对不同布置方式进行计算, 对各种布置的受力性能进行了分析, 并比较几种布置方案的优缺点, 以寻求双向大跨预应力混凝土楼盖合理的结构布置形式. 郑州国际会展中心展览大厅下部混凝土结构, 地上 6 层, 地

下 2 层; 两端为剪力墙筒体, 中间为 2 层大跨预应力混凝土楼盖. 该楼盖为纵横梁承重方案, 横向柱网尺寸为  $21\text{ m} + 30\text{ m} + 30\text{ m} + 21\text{ m}$ , 纵向由变形缝分割成柱网尺寸为  $28.2\text{ m} + 28.2\text{ m}$  的独立单元. 每个独立单元楼盖横向两端支承在剪力墙筒体上, 中部由 9 根柱子支承, 见图 1. 沿柱子轴线纵向向各布置三道大主梁, 把整个楼盖划分成 8 块, 每块另外进行结构布置. 结构独立单元柱网分布如图 2 所示.

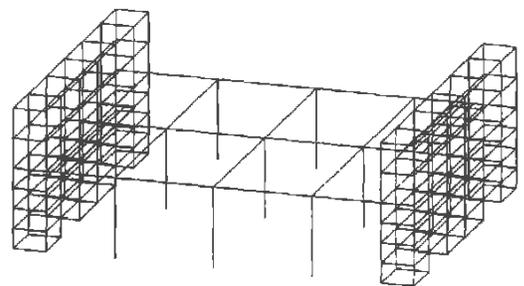


图 1 计算单元模型

Fig. 1 The model of analytic unit

## 1 结构布置

### 1.1 结构布置方案

根据结构的传力途径不同, 作者共设计了 3 种结构方案, 5 种结构布置方式, 分别介绍如下.

**方案 1:** 主次梁方案. 主次梁结构是在一个方向布置尺寸较大的主梁, 另一个方向布置尺寸较小的次梁, 荷载通过板传递到次梁, 再由次梁传递

收稿日期: 2004-09-10; 修订日期: 2004-12-20

基金项目: 河南省教育厅科技攻关项目(2003560313); 郑州市重点工程资助项目(ZDGC02-01)

作者简介: 童丽萍(1960-), 女, 陕西省周至县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事结构分析方面的研究.

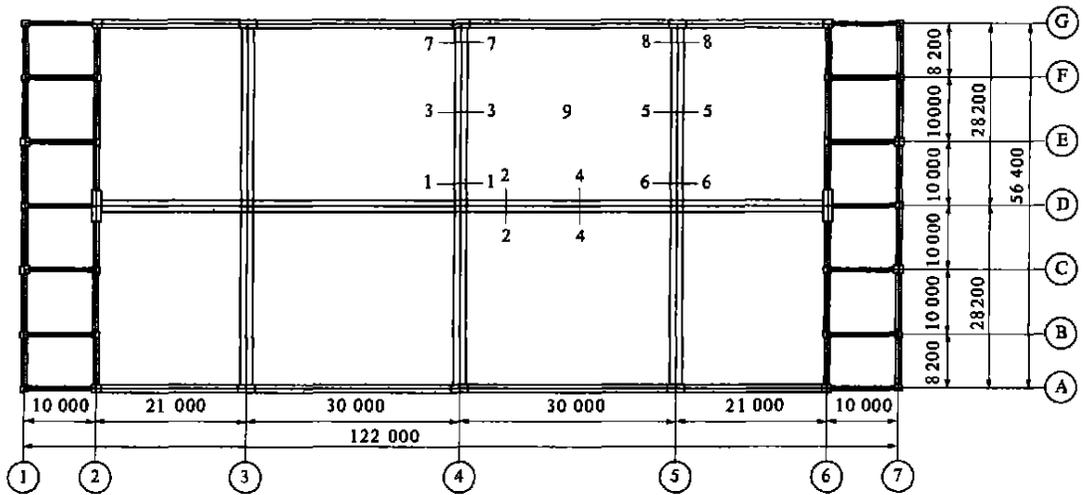


图2 标准单元柱网以及计算控制截面

Fig. 2 The column grid of standard unit and the controlled sections

到主梁上.该结构具有结构层刚度大,传力路径明确等优点.但由于主次梁高度不同,结构层高度取决于较大的主梁,使得结构层高度过大,结构层高增加.本方案共设置两种结构布置方式.

布置方式 I:主梁沿横向布置,间距 10 m,次梁沿纵向布置,间距 5 m.

布置方式 II:主梁沿横向布置,间距 10 m,次梁沿纵向布置,间距 5 m.主次梁及板尺寸见表 1.

方案 2:次梁承重方案.布置方式 III:次梁承重方案沿一个方向布置次梁,荷载由板传递到次梁上,再由次梁直接传递到两端支物上.由于只有一个方向有次梁,次梁中的预应力值较大,可以有效解决超长混凝土的抗裂性<sup>[3]</sup>.笔者沿横向布置次梁,这样布置省去纵向预应力筋的设置,方便施工;横向次梁把整个楼面分成单向板,荷载的传递更为简洁,构件的受力不再复杂;在纵向没有设置预应力筋,横向边梁不用设置锚具,横向边梁的受力更为简单,使得边梁的尺寸大为减少.该方案中次梁跨度 30 m,次梁间距 5 m.结构构件尺寸见表 1.

方案 3:井字梁方案.井字梁方案在两个方向等间距布置相同截面的梁,属于空间受力体系.荷载直接向方形板格四周的梁上传递.井字梁通过两个方向在竖向变形相协调的原则来传递内力,受力性质同双向板相似,力相互传递分配比均匀<sup>[3]</sup>.同时井字梁还具有水平刚度大、梁截面小、挠度值小的特点.这里设置两种井字梁布置方式.

布置方式 IV:采用双级井字梁,一级井字梁间距 10 m,施加有粘结预应力;二级井字梁间距 2.5 m,施加无粘结预应力.

布置方式 V:采用一级井字梁,间距 5 m,施加有粘结预应力.

表 1 不同布置方案时结构构件尺寸

Tab. 1 The member size of different structure layout

| mm  |             |             |           |     |      |
|-----|-------------|-------------|-----------|-----|------|
| 方式  | 主梁          | 一级次梁        | 二级次梁      | 板厚  | 平均厚度 |
| I   | 1 600×2 500 | 1 200×2 100 | 700×1 800 | 200 | 272  |
|     | 1 600×2 800 |             |           |     |      |
| II  | 1 600×2 500 | 1 200×2 100 | 700×1 800 | 200 | 272  |
|     | 1 600×2 800 |             |           |     |      |
| III | 1 600×3 000 | 1 000×2 400 | —         | 200 | 270  |
| IV  | 1 600×2 500 | 700×1 800   | 300×750   | 150 | 215  |
|     | 1 600×2 800 |             |           |     |      |
| V   | 1 600×2 500 | 700×1 800   | —         | 200 | 277  |
|     | 1 600×2 800 |             |           |     |      |

1.2 预应力筋的布置与张拉

方案 1:主次梁方案.方案中次梁的荷载形式为自重和楼板传来的均布荷载,预应力筋的线形选用 4 段抛物线型;主梁的荷载形式包括自重及楼板传来的均布荷载和次梁传来的集中荷载,预应力筋选用 4 段抛物线型和折线型 2 种.主梁横向边跨只有一道次梁,折线型预应力筋为 2 折线型;中间跨有两道次梁,折线筋选为 3 折线型.由于主梁上次梁传来的集中荷载较大,预应力筋的分配系数折线型较大,选为 0.65,抛物线型为 0.35.

方案 2:次梁承重方案.次梁承受单向板传来的均布荷载,预应力筋采用 4 段抛物线型.主梁由于次梁数量多,预应力的线型若考虑采用折线型,则预应力筋的布置相当复杂;次梁的集中荷载多而且分布均匀,依然使用 4 段抛物线型预应力筋.

方案 3:井字梁方案.井字梁方案中,双向梁把楼板分成小方格,楼面荷载直接传递到方格周围的梁上,每段梁上为三角形荷载,可以等效看作均布荷载.两种布置方式中预应力线型均采用 4

段抛物线型。

考虑到由于结构横向超长等因素引起的混凝土收缩、徐变、抗裂以及有效预应力的建立等问题,在以上3种方案5种布置方式中,预应力都采用二次张拉方案。即在图1中3轴和5轴21m跨内预留后浇带,后浇带宽1m,采用膨胀混凝土浇注。中间30m+30m跨先张拉,两边21m跨等后浇带膨胀混凝土达到一定强度后张拉。

### 1.3 结构材料选用

结构材料选用如下:梁板混凝土C40,柱子和剪力墙混凝土为C50。预应力采用后张法,预应力筋为 $\Phi 15.24$ 钢绞线, $f_{pk}=1860\text{ MPa}$ ,锚具选用XM15-1型。

## 2 各结构布置方案受力性能分析

### 2.1 预应力作用的计算

采用等效荷载法考虑预应力的作用,采用荷载平衡法进行预应力筋的设计。根据等效荷载法,预应力筋对结构的作用力可以分解和简化为与预应力作用相同的外荷载来考虑。等效荷载的形式和预应力筋的线型有关,主要包括构件端部锚具处的集中力(和弯矩)以及由于预应力筋曲率的改变而引起的垂直于预应力筋中心线的横向分布力或集中力。本文选用抛物线型和折线型两种。

梁上抛物线型预应力筋的作用可以等效为沿梁轴线的水平力 $N_p \cos \theta$ ,竖向端部集中力 $N_p \sin \theta$ 和竖向向上分布力 $\omega_p$ <sup>[4]</sup>:

$$\omega_p = \frac{8N_p e_1}{l},$$

其中: $e_1$ 为预应力筋偏离梁中心的最大值; $l$ 为梁的跨度。

梁上折线型预应力筋的作用可以等效为沿梁轴线的水平力 $N_p \cos \theta$ ,竖向端部集中力 $N_p \sin \theta$ 和线形弯折处集中力 $F$ :

$$F = \frac{4N_p e_2}{l},$$

其中: $e_2$ 为预应力筋弯折处离梁中心的高度。

超静定连续梁的预应力设计由荷载平衡法确定。由等效荷载法可知预应力的作用可以简化为等效荷载。我们所选取预应力筋的原则是使得其等效荷载与结构外荷载分布形式相同、方向相反、大小相当,这样可以平衡掉大部分外荷载,使结构内力大为减少。本文楼盖中梁的外荷载形式包括梁自重以及板直接传来的均布荷载和另一方向梁传来的集中荷载两种形式,所以预应力筋线型相

应选择为抛物线型和折线型<sup>[3]</sup>。

### 2.2 不同结构方案受力性能分析

采用中国建筑科学研究院预应力计算程序PREC对上述3种方案5种布置方式分别进行了计算。该楼盖双向对称,计算结果显示最大的内力和变形出现在中间30m×28.2m跨内。在图1中有代表性的板块中选取8个控制截面(见图2),这8个截面反映了纵横向主梁的最大内力和变形以及板块中央的最大变形,也即是整个楼盖的最大变形。不同方案中控制截面的内力变形等受力特性列于表2中。

#### 2.2.1 主次梁方案

在第I种结构布置方式中,荷载的传递是由板到次梁再到主梁。由计算结果也可看出,沿横向布置的主梁内力大于沿纵向布置的次梁内力,但是4轴处的纵向主梁内力与其它主梁相比最大,控制截面1-1的内力是整个结构中的最大内力,达-61439kN·m。在预应力筋的用量方面,纵向预应力筋用量大于横向预应力筋用量。就结构变形而言,横向主梁挠度整体上大于纵向次梁挠度。最大挠度位置在横向主梁跨中处,为35.86mm。

第II种结构布置方式和第一种相似,由计算结果知道,整体上纵向主梁的内力大于横向次梁的内力,最大内力仍在4轴纵向主梁上。由于横向次梁较多,预应力筋的用量横向大于纵向。结构变形方面,横向次梁挠度大于纵向主梁挠度。最大挠度位置在横向次梁跨中处,为38.45mm。

#### 2.2.2 次梁承重方案

本方案中次梁间距小跨度大,楼板被分割成单向板,荷载沿一个方向传递,造成纵横向内力分布差异很大。从计算结果可以知道,横向布置的次梁内力为-12126kN·m,远小于纵向主梁内力-97386kN·m,内力最大仍在4轴控制截面1-1处。由于只有单向次梁,结构横向次梁预应力筋用量和其它方案相比要小。就结构的变形而言,横向次梁挠度整体大于纵向主梁,结构的最大挠度发生在30m方格中央横向次梁处为45.77mm,该处的挠度为横向次梁挠度叠加上纵向主梁的挠度,大于主次梁方案。

#### 2.2.3 井字梁方案

井字梁方案沿双向等间距布置梁,荷载向两个方向传递比较均匀。第IV种结构布置方式中,计算表明,纵横向梁的内力相差不大,证实了井字梁双向协同工作的特性。最大内力发生在4轴控制截面1-1处,为-52575kN·m。预应力筋的用量

表2 不同结构布置方案结构的内力特性和挠度

Tab.2 The structural behavior and flexibility of different structure layout

| 方案     | 布置方式 | 控制截面弯矩/(kN·m) |         |        |        |        |         |         |         | 挠度/mm |
|--------|------|---------------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-------|
|        |      | 1-1 截面        | 2-2 截面  | 3-3 截面 | 4-4 截面 | 5-5 截面 | 6-6 截面  | 7-7 截面  | 8-8 截面  |       |
| 主次梁方案  | I    | -60 439       | -50 501 | 45 711 | 38 567 | 40 357 | -53 614 | -6 085  | -6 471  | 35.86 |
|        | II   | -61 568       | -48 559 | 45 368 | 36 293 | 40 903 | -55 139 | -6 904  | -7 490  | 38.45 |
| 次梁承重方案 | III  | -97 386       | -12 126 | 74 220 | 9 179  | 59 438 | -78 861 | -13 694 | -11 534 | 45.77 |
| 井字梁方案  | IV   | -52 575       | -43 138 | 40 393 | 32 703 | 36 551 | -48 101 | -2 596  | -4 504  | 42.91 |
|        | V    | -66 475       | -50 146 | 51 579 | 39 468 | 45 444 | -58 353 | -6 729  | -5 937  | 39.42 |

两个方向相差不大.就结构变形而言,横向梁的挠度大于纵向梁的挠度,结构最大挠度发生在30 m方格中央横向梁处,达42.91 mm.

第V种布置方式中,由计算可知,双向梁内力差别不大,横向梁内力略大于纵向梁内力,最大内力仍位于4轴控制截面1-1处,双向预应力筋用量差别不大.就结构变形来说,横向挠度大于纵向挠度,最大变形发生在横向梁跨中处为39.42 mm.

#### 2.2.4 不同方案结果比较

主次梁方案中,纵横两种布置方式结构的内力和变形差别不大.内力分布和结构的布置相对应,横向布置次梁时,控制截面1-1的内力略大于纵向布置次梁时截面的内力;而控制截面2-2刚好相反.由两种布置方式控制截面1-1和2-2的内力可以看出,纵向主梁的内力总大于横向主梁.就预应力筋用量而言,主次梁方案布置方式I所用较多.由表2可知,沿纵向布置次梁时挠度比沿横向小7%.于其它方案相比,该方案受力较均匀,变形最小,预应力筋用量介于其它两种方案之间.

次梁承重方案中,楼板被分割成单向板,荷载沿一个方向传递,横向次梁的内力与其它方案相比最小,纵向主梁与其它方案比则大很多.由于只有一个方向布置预应力筋,预应力筋的用量在各方案中是最少的.就纵向主梁的挠度而言,该方案大于主次梁方案和井字梁方案.结构的最大挠度发生在30 m方格中央横向次梁处,该处的挠度为横向次梁挠度叠加上纵向主梁的挠度,也大于主次梁方案.由表2可知,次梁承重方案结构最大挠度比主次梁方案大28%,比井字梁方案大16%.

井字梁方案计算结果表明,纵横向大梁的内力相差不大.井字梁方案两种布置方式中,第V种布置方式结构平均厚度和结构内力都大于第IV种布置方式.第IV种方式预应力筋用量较第V种少8%.但是第IV种方式有两级井字梁,构件截面较多;一级井字梁施加有粘结预应力,二级井字梁施

加无粘结预应力,施工较困难.与其它方案相比,其内力的分布最均匀,内力值与主次梁方案相差不大.预应力筋的用量双向差别不大,总量在各方案中是最多的.就结构变形而言,最大挠度在30 m方格中央,略大于主次梁承重方案.

### 3 结论

(1) 对于这种双向跨度相差不大的大跨结构,预应力井字梁方案是较优方案.由于二级井字梁方案结构布置复杂,施工难度较大,所以一级井字梁方案相比较更为适用.

(2) 不同的结构的布置方式只改变梁格内部内力的分布,而对柱网主梁的内力影响不大.各种布置方案的4轴处的主梁内力总是最大的.

(3) 楼盖的变形沿横向总大于沿纵向的变形,说明变形的大小和跨度有关,而结构的布置方式对其影响不大.

(4) 两端刚度较大的筒体限制了楼盖的自由收缩变形,混凝土的自由收缩和温度变形容易造成混凝土楼盖的开裂.基于以上原因,宜减少混凝土的一次浇注长度.

### 参考文献:

- [1] 童丽萍,任俊超,唐碧凤.郑州国际会展中心吊挂式索拱钢屋盖体系研究[J].工业建筑,2004,34(3):65~67.
- [2] 李桢章,杨新生,李恺平,等.广州新白云国际机场航站楼混凝土结构设计[J].建筑结构学报,2002,23(5):84~86.
- [3] 刘军.井字梁屋盖在大跨度框架结构体系中的应用[J].甘肃科技,2001,(5):21~22.
- [4] 薛伟辰.现代预应力结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.95~99.
- [5] 李谦,赵更歧,罗健雄,等.预应力双向叠合楼盖的工程应用及造价分析[J].郑州大学学报(工学版),2002,24(1):91~94.

(下转第46页)

进一步探讨了耗能阻尼器的阻尼和次框架刚度对结构控振的影响后,提出了耗能阻尼器与次框架刚度的合理取值范围,对结构设计具有指导性作用.因此,巨型一子控制结构体系既具有普通巨型框架结构体系的优点,又具有控振功能,且控振效果明显,不仅适用于钢筋混凝土结构,也适用于钢结构,对于抗风抗震都适用,有广阔的应用前景.

### 参考文献:

- [1] MARIA Q. Feng vibration control of tall building using mega subconfiguration[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 10: 1082~1087.
- [2] WINSTON C, MARIA Q. Feng vibration control of super tall buildings subjected to wind loads[J]. Non-Linear Mechanics, 1997, (2): 657~668.
- [3] 蓝宗建. 钢筋混凝土巨型框架多功能减振结构地震反应分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 77~83.
- [4] 方同. 工程随机振动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [5] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [6] 张洵安, 张建林, 姜节胜. 子结构刚度对巨型框架减振结构体系的动态特性影响[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(1): 59~63.
- [7] 彭刚, 张国栋. 土木工程结构振动控制[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002.

## Study on Mega-Sub Controlled Systems Subjected to Non-stationary Seism Loads

ZHANG Xun-an, WANG Ning

(School of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Vibration control mechanism and superiority of a new control system—mega-sub controlled systems are studied. Based on the complex mode analysis theory of random vibration for comparison, a megafloor without control and one with sub control are studied under the same non-stationary seismic load conditions. The displacement response of mega frame coping reduces 95.70%, the acceleration response reduces 24.08%. The significant cost-effectiveness of the mega-subframe systems is demonstrated in controlling the acceleration and demonstrated responses of mega frame to seismic loads, not only enhancing the safety of structure but also improving the comfort of occupants. Two factors—subsidary frame shearing rigidity and the damp of damper effecting on the response of systems—the rigidity ratio is more than 0.15 and avoids 0.4 and the damp ratio from 1.0 to 3.0. The response of the system is reduced.

**Key words:** mega-sub controlled system; complex mode theory; non-stationary seismic excitation; tuned mass damper; vibration control structure; rigidity; damp

(上接第27页)

## Study on Structural Layout Choice of Large-span Prestressed Concrete Floor

TONG Li-ping, WANG Yan-chao

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** There are various styles of large span prestressed concrete floor. Different floor need suitable structural layout of different structural behavior. This paper selects the floor structure arrangement of ZZCEC, and calculates 5 floor framing systems of RC floor system, the long prestressed span beam system and the concrete cross beam system. Through the analysis of the static behavior and the comparison of the merits and faults, the reasonable structure arrangement of the floor structure can be acquired. This paper can also be useful for such large span prestressed concrete floor.

**Key words:** prestressed concrete; large span floor; structural behavior