

# 预应力技术在现浇空心楼盖中的应用

徐 焱

(北京清控水木建筑工程有限公司 北京 100084)

**摘 要:**本文主要说明预应力技术在现浇混凝土空心楼盖中应用的特性,着重介绍一种新研制的LPM预应力空心楼盖结构技术,及一些现浇预应力空心板的代表性工程,实践证实空心楼盖中使用现浇预应力空心板具有技术、经济优势。

**关键词:**预应力 空心楼盖 现浇混凝土

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2016.02.002

## 1 前言

现浇空心楼盖是从上世纪末本世纪初开始兴起的一种结构形式,其主要应用于大跨度结构中,而预应力技术也适用于大跨度、大荷载结构。与现浇混凝土空心楼盖这一新兴技术相比,预应力结构技术相对更为古老,预应力混凝土由于具有结构使用性能好、不开裂、刚度大、耐久性好以及经济等优点。当跨度相对较小(跨度 $<10\text{m}$ )或者荷载较小时,预应力与空心楼盖往往是彼此竞争的技术;当跨度较大或者荷载较大时,将上述两项技术结合在一起,能发挥 $1+1>2$ 的效果。LPM预应力空心板主要适合下面三大类的工程:(1)局部是大开间;(2)内筒外框的高层建筑;(3)大荷载地下车库顶板。

## 2 局部大开间

### 2.1 结构特性

这里所说的局部大开间是指在结构中,由于使用功能的需要把局部区域的平面尺寸调整得更大。比如某些框架结构建筑中,在一些区域内取消了若干柱子,将使用区域的平面净尺寸变得更大。

在局部大开间中采用预应力空心板有以下优越性:

(1)降低结构的高度。与传统密肋梁或者井字梁结构相比,预应力空心板不但可以大大降低大开间范围内的结构高度(一般降低40%~60%),还可以相应降低大开间周圈的结构高度(因为周圈的框架梁要作为密肋梁或者井字梁的

支座,其结构高度显然应更高)。

(2)可以减小竖向构件的弯矩。采用预应力空心板后,对于空心板区域无论是采用拟板法还是拟梁法计算时,都可以大大减小竖向构件(柱子)的弯矩。采用拟板法时,可以将空心板当作周圈简支的单向板或者双向板,因为按简支计算,所以空心板在支座产生的弯矩为零。采用拟梁法时,由于一定宽度范围内空心板所替代的拟梁刚度较通常的密肋梁或者井字梁要降低很多,所以在梁柱节点处对柱子产生的弯矩也要减小。柱子的弯矩减小了,柱截面尺寸可以相应减小,这种效应在顶层采用大开间的结构中尤其明显。

### 2.2 典型工程介绍

#### (1) 奥运射击馆

2008年奥运会北京射击馆的资格赛馆部分室内比赛场跨度达23.7m,大开间北边柱间距为22.5m,南边柱间距为7.5m。使用功能要求水平构件的高度要小,竖向构件的尺寸也不能太大,结构自重要小,还要求控制工程造价。在结构选型阶段时分别考虑过多种方案,如预应力密肋梁结构、钢结构。采用预应力密肋梁结构,密肋梁的尺寸为 $400\text{mm} \times 1300\text{mm}$ ,同时为了抵抗柱端弯矩,柱截面尺寸为 $600\text{mm} \times 1200\text{mm}$ (见图1)。

最后经过全面比较,确定采用现浇有粘结预应力单向空心板结构形式。空心板厚度为700mm,空心率为51%。空心板按单向简支板设计。在支座处预应力筋合力点在截面的中性轴

处,从而尽可能消除板端的支座负弯矩,同时也减小支承边梁的扭矩及其框架柱的弯矩;由于柱端弯矩为零,柱截面尺寸按轴压比控制就可以,从而降为800mm×800mm。

虽然柱子与空心板按铰支连接计算,但实际设计时,在沿空心板跨度方向每排框架柱位

置设置暗梁,暗梁与框架柱的节点按刚节点计算一次,暗梁中预应力筋的布置也按梁端能够承受负弯矩的要求设计,地震作用产生的梁端弯矩全部由非预应力钢筋承受,从而保证了框架体系的整体性和抗震能力。

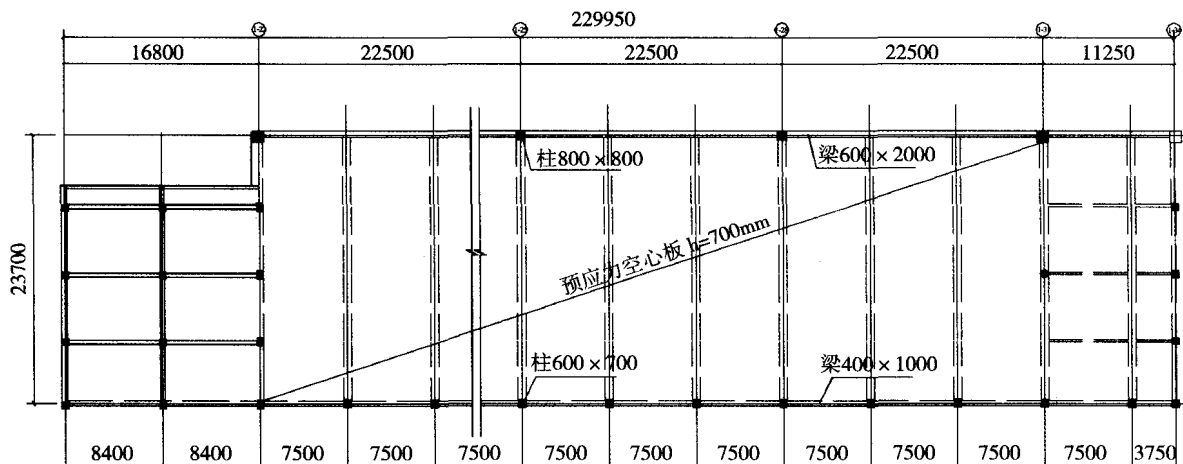


图1 奥运射击馆资格赛馆局部平面图

## (2) 多伦职业学校

内蒙古多伦职业学校标准柱网为8000mm×8600mm(见图2),标准柱截面为800mm×800mm,在4层拔掉了15根柱子,形成了一个32000mm×51600mm的大开间。在最早的结构方案中,此区域设计成井字梁结构,梁截面为600mm×2000mm,楼盖混凝土折算厚度为547mm。由于本层为顶层,大开间周围的柱都是大偏压构件,为满足受力要求,柱截面尺寸需调整为1000mm×1500mm,而且1-3层的柱也要随着调整尺寸。

经综合论证,最后采用LPM预应力现浇空心板方案,板厚度为1000mm,折算厚度为474mm,空心率为52.6%。仅边柱截面尺寸调整为800mm×1200mm,在空心板短跨(32m)方向构造了5道600mm×1000mm暗梁来增强结构的整体性和抗震性。

## (3) 育民小学地下结构

北京市育民小学分校工程室内游泳池顶板为大跨度地下结构,共有两个大开间,尺寸分

别为38.4m×22.1m和48.0m×22.1m。结构上部有1.5m的覆土,并要考虑消防车的荷载。该区域原设计方案为型钢混凝土梁结构,其中主框架梁尺寸为600mm×2000mm(见图3)。

因施工现场地处闹市区,按照原设计方案,大型钢骨梁现场整体吊装困难大,而分段吊装再拼接现场施工质量难以保障,且施工完成后游泳池使用净高略微不足。建设单位经多方咨询比较后,决定采用LPM预应力空心楼盖结构技术。

空心板厚度为1200mm,在原框架柱上设置700mm×1200mm的暗梁,暗梁中集中配置有粘结预应力筋,暗梁之间为空心板区,体积空心率为53.5%;空心板填充材料之间设置预应力肋梁,短向配置有粘结预应力筋,长向配置无粘结预应力筋。

## (4) 义乌复元医院新院区

浙江义乌复元私立医院新科大楼工程裙房五层顶跨度大(直径33.6m的圆形结构)、荷载大(除了屋面的通常做法外,有50cm的种植土)。在该工程的初始方案中,是采用6道放射性布置



指标进行综合比较。为了确定结构的选型,由业主组织召集各方面的专家召开了多次论证会。方案(3)不但造价高,而且由于结构刚度小,较难满足射击比赛使用功能的要求。方案(2)在水平构件本身的造价是最低的,但是为了保证同样的使用净空,需要将整个楼层都提高600mm,这就要大大增加其它竖向和维护构件的费用。

空心板结构良好的隔声、隔热性能最符合业主对结构功能的要求,与方案(1)相比虽然每平方米造价增加100元,总造价增加50万元;但是降低层高减少竖向构件的造价30万元,同时降低长期使用的成本100万元;实际经济效益为80万元。按照节俭办奥运的原则,各方一致决定采用预应力混凝土现浇空心板方案。

### (2) 育民小学地下结构

统计出型钢梁和空心板两个不同方案中各种材料的用量(包括基础和竖向构件),按照市场

综合单价计算总造价(见表2)。

采用预应力空心板方案后,在减少施工难度顺利完成施工的同时还将结构净空提高了800mm。而根据成本计算,更改方案后楼盖总造价约减少31万元,每平方米降低造价约170元。如果一开始就采用空心板,还可以避免柱中预埋型钢,则综合造价可降低约200元/m<sup>2</sup>。

### (3) 多伦职业学校

在设计阶段,设计院曾对井字梁结构与预应力空心板两种结构形式进行了综合比较(见表3),虽然在此区域内井字梁结构的造价要低,但是井字梁结构要引起其它费用的增加。如1)吊顶装修费用更高;2)施工更复杂费用更高;3)重量更大引起的竖向构件造价增加;4)层高加大引起的竖向构件造价增加;5)柱尺寸加大引起的费用增加。最后确定采用预应力空心板的方案。

表1 不同结构形式综合性能比较(按2004年造价)

方案名称	结构高度(mm)	结构造价(元/m <sup>2</sup> )	力学性能	施工性能
(1) LPM预应力空心板	700	780	自重较轻,传力简捷,主体框架受力较合理。	施工较方便,仅浇筑混凝土时要有专门的技术措施。
(2) 预应力混凝土密肋梁楼盖	1300	680	自重大,需要加大框架梁柱的断面。	模板复杂,施工慢,楼板暗敷管线困难。
(3) 钢管混凝土柱与密肋钢梁组合楼盖	1400	1100	自重轻,刚度小,位移偏大。	构造复杂,用钢量大,安装较困难。

表2 不同结构形式综合性能比较(按2013年造价)

项目	单位	单价(元)	空心板方案		型钢梁方案	
			总量	总价	总量	总价
普通钢筋	t	7800	224.31	1749618.00	207.5	1618500.00
混凝土	m <sup>3</sup>	850	1153.62	980577.00	961.35	817147.50
有粘结预应力	t	15500	53.5	829250.00	0	0
无粘结预应力	t	14000	22.3	312200.00	0	0
填充材料	m <sup>3</sup>	520	1153.62	599882.40	0	0
钢结构	t	13500	0	0.00	173.8	2346300.00
				4471527.40		4781947.50

表3 井字梁结构与预应力空心板的经济性比较(按2011年造价)

楼盖形式	楼盖造价 (元/m <sup>2</sup> )	造价修正(元/m <sup>2</sup> )					修正总造价	价差 (元/m <sup>2</sup> )
		吊顶	施工	重量	层高	柱尺寸		
井字梁结构	982.75	10	15	16.37	68.7	78.5	1171.32	0
预应力空心板	1136.07	0	0	0	0	0	1136.07	-35.25

### 3 大跨度高层建筑

#### 3.1 结构特性

在空心楼盖工程中，降低结构高度、减轻楼盖自重除降低自身造价外，还可以减小地震反应，从而降低竖向构件（如柱、墙、基础）的造价。因此，对于高层建筑，减轻结构自重有着特别重要的意义，高层建筑中非常适合采用空心楼盖技术，而采用预应力可以进一步降低结构高度且减轻自重。

在混凝土结构高层建筑中，通常的结构形式中部为剪力墙的核心筒，周圈为框架外框或者密柱深梁的外筒。现浇空心板技术在混凝土高层建筑中的应用情况分三种：

(1) 内筒和外框之间仅在角部设置4道或者8道预应力扁梁，其余框架柱与内筒以暗梁连接，板采用预应力空心板或普通空心板，典型工程有北京主语城，石家庄广电中心等。

(2) 内筒和外框之间的所有框架柱上都设置预应力明梁（或扁梁），仅在梁之间大开间采用双向空心板，典型工程有北京万达广场、呼和

浩特万铭商务中心等。

(3) 内筒和外框之间的所有框架柱上都设置预应力暗梁，板采用预应力空心板，该种类型空心板近年来被广泛使用，典型工程有全国总工会二期、将台商务中心和廊坊银丰广场等。

#### 3.2 典型工程介绍

##### (1) 北京主语城

该项目整个建筑群的布局分南北两大区，每大区由5栋建筑组成。两大区中共有5栋为框架核心筒结构，最高24层，内筒和外框之间最大轴线距离为10.8m；为了降低结构层高度，同时减轻水平构件的重量，从2层以上采用了LPM预应力空心楼板结构技术。

5栋框筒高层建筑水平构件主要采用单向预应力空心板技术（见图5），跨度分别为10.8m和9.9m，板厚则取300mm和280mm。在角部设置4道预应力扁梁，扁梁尺寸2000mm×350mm；其余框架柱上设置预应力暗梁，暗梁尺寸1000mm×300mm。扁梁与暗梁中采用有粘结预应力；空心板中采用无粘结预应力。

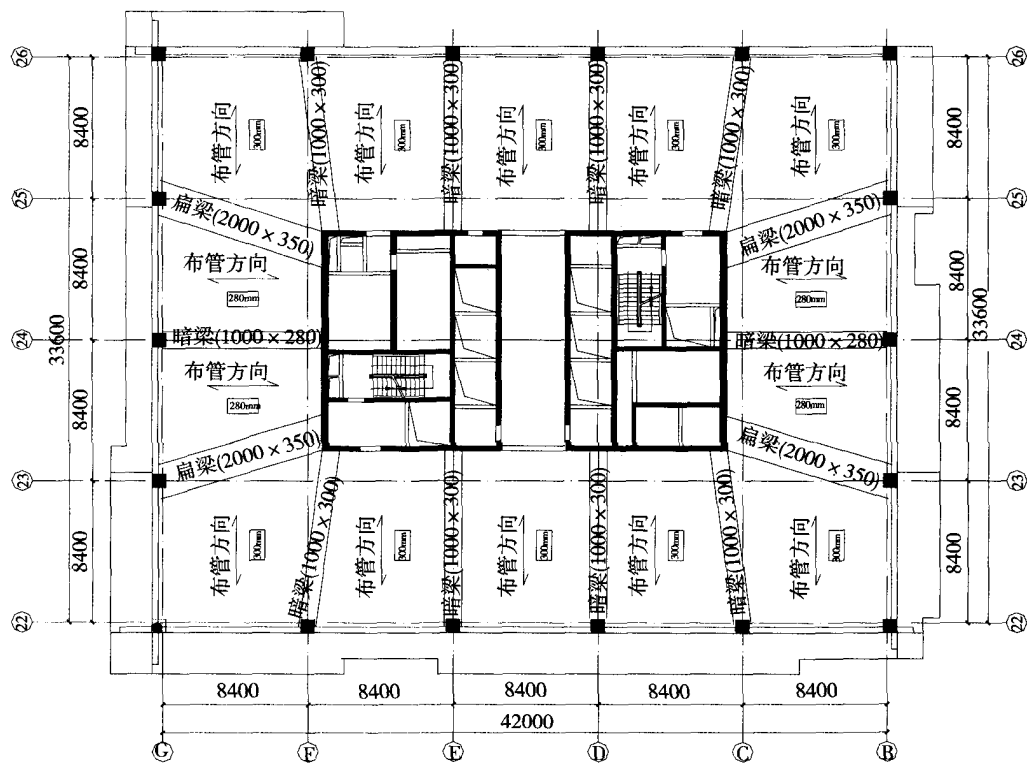


图5 主语城北地区CN4结构平面图

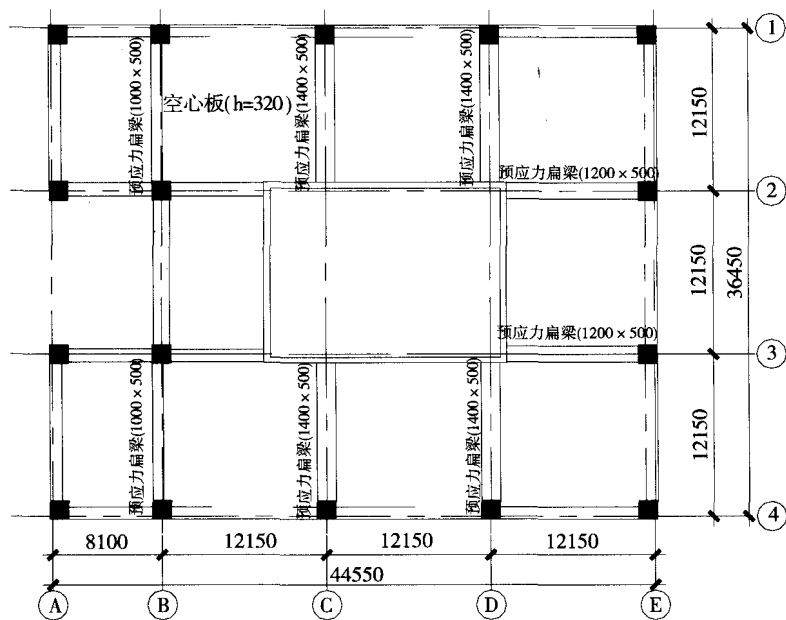


图6 万达广场结构平面图

(2) 全国总工会二期

全国总工会二期（又名中国职工对外交流中心）工程总建筑面积4.97万 $m^2$ ，是集酒店与办公为一体的一个具有综合性、多功能的建筑，其主楼为钢筋混凝土框架核心筒结构，平面尺寸为38m $\times$ 33m，标准层高3.7m，总高度为97.1m。内筒和外框之间距离为11.1m。从二层起至二十四

层采用了预应力空心楼盖技术。预应力空心板方案（见图7）的特点是四个角部设置4道尺寸为800mm $\times$ 300mm的预应力框架斜暗梁，其它框架柱上设置尺寸为1000mm $\times$ 300mm的预应力框架暗梁，内筒与外框之间的所有楼板都设计成单向预应力空心板，板厚度300mm，体积空心率为43%。

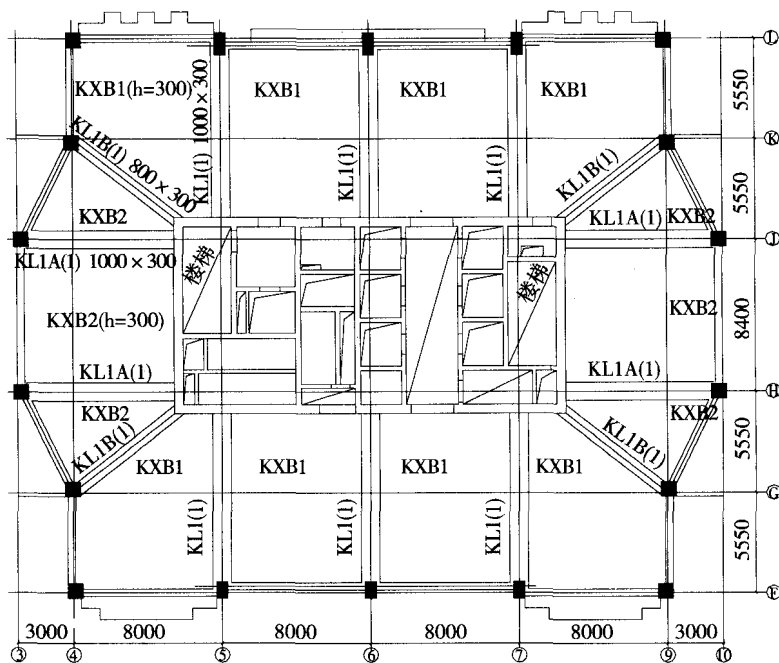


图7 全国总工会二期结构平面图

### (3) 廊坊银丰广场

廊坊银丰广场总共28层，既有酒店又有办公楼。主楼平面尺寸为 $37.2\text{m} \times 37.2\text{m}$ ，内筒和外框之间距离为 $11.3\text{m}$ 。从六层起至二十六层采用了预应力无梁空心楼盖。楼盖特点是四个角部设置8道尺寸为 $1000\text{mm} \times 350\text{mm}$ 的预应力暗梁，中部暗梁 $600\text{mm} \times 350\text{mm}$ 。中部 $350\text{mm}$ 厚度的预应力空心板体积空心率为 $54\%$ ，混凝土折算厚度 $161\text{mm}$ ；角部预应力空心板体积空心率为 $46\%$ ，混凝土折算厚度 $189\text{mm}$ （见图8）。

### 3.3 相关经济性指标

#### (1) 全国总工会二期

在确定结构方案之前，曾进行多个方案的论

证比较，分别为：

1)、密肋梁方案（见图9）。其特点是在四个角部设置4道尺寸为 $500\text{mm} \times 600\text{mm}$ 的预应力框架斜梁和 $400\text{mm} \times 550\text{mm}$ 框架梁，次梁 $250\text{mm} \times 550\text{mm}$ 、板厚 $120\text{mm}$ 。

2)、预应力实心板方案（见图10）。四个角部设置 $800\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的预应力斜梁，其它框架暗梁尺寸分别为 $1000\text{mm} \times 260\text{mm}$ 和 $1000\text{mm} \times 220\text{mm}$ ，楼板为 $260\text{mm}$ 预应力实心板。

经不同方案对比（见表4），虽然预应力空心板名义造价最高，但因结构自重较轻，可以降低竖向构件与基础造价 $3\% \sim 10\%$ ，同时净空提高且隔声、隔热性能好而被业主采用。

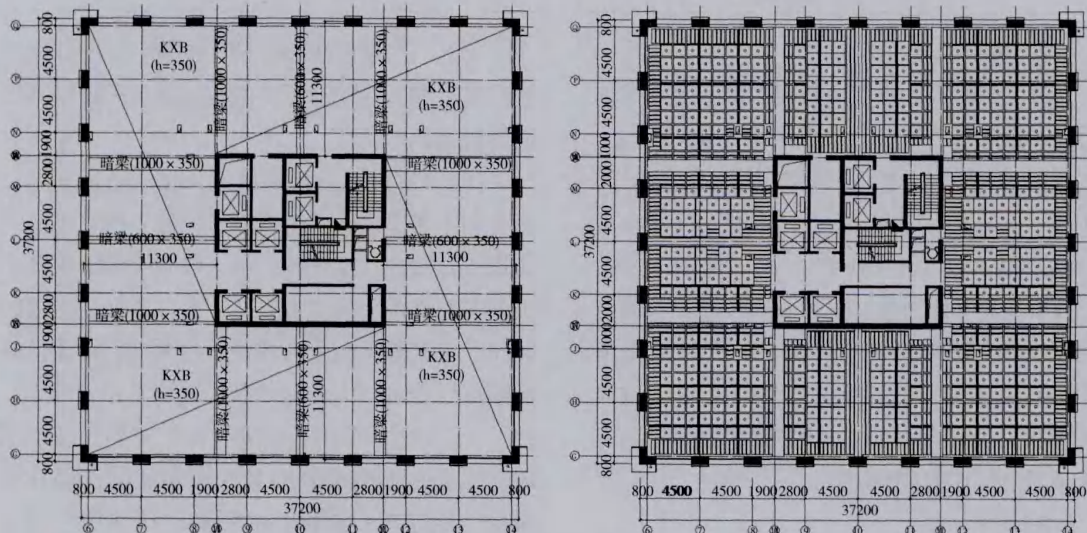


图8 廊坊银丰广场结构平面与填充块布置图

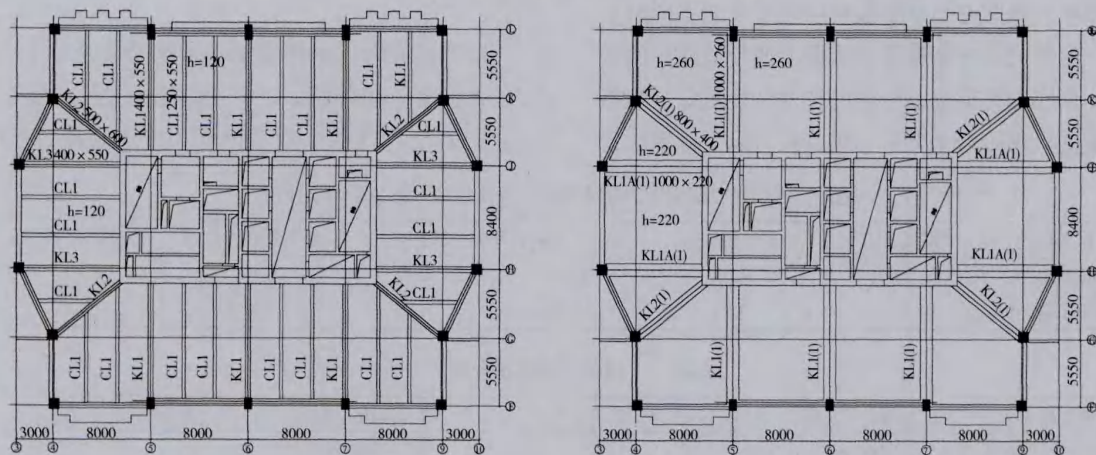


图9 密肋梁方案

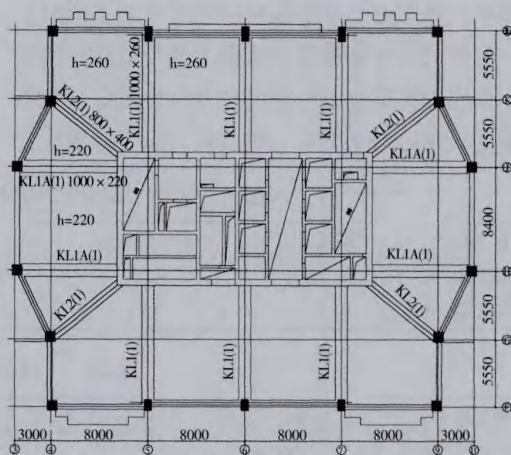


图10 预应力实心板方案

表4 全国总工会不同结构形式综合性能比较(按2007年造价)

方案名称	密肋梁	实心板	空心板
单位			
普通钢筋(kg)	28.70	26.60	21.65
预应力筋(kg)	3.50	6.63	4.97
面积			
混凝土量(m <sup>3</sup> )	0.205	0.260	0.171
材料			
轻质管(m)	0	0	2.56
用量			
模板量(m <sup>2</sup> )	1.33	1.00	1.00
每平方米造价(元)	330.58	381.34	393.41
结构高度(mm)	600	400	300
折算板厚(mm)	165	260	171
优点	结构造价最低。	结构高度最小， 施工方便。	整个楼层内筒和外框之间为一块大平板，使用非常方便；另外结构自重轻，结构高度较小，平板施工较方便。
缺点	结构高度较高，密肋结构支模时间长，施工进度较慢。	结构造价较高，结构自重较大。	楼盖本身造价相对较高。

## (2) 廊坊银丰广场

在提出预应力无梁空心板方案的同时，设计院还提出密肋梁方案，并比较造价(见表5)。

若保持净空不变，密肋梁结构需增加层高350mm，每平方米增加综合造价约 $1.2\% \times 350\text{mm}/100\text{mm} \times 1500\text{元} = 63\text{元}$ 。(根据工程经验，每增加100mm层高，包括竖向构件、玻璃幕墙等需增加1%~1.5%的综合造价，综合造价按1500元/m<sup>2</sup>计算。)因此，须对楼盖造价进行修正，结果如表6:

## 4 大荷载地下车库顶板

### 4.1 结构特性

地下车库的开间尺寸一般是8m~10m，在停车层中，预应力与空心板两项技术一般不同时采用；但是对于上部有覆土或要求通行消防车的楼盖，预应力无梁空心楼盖的技术性能最好，造价也最低。预应力无梁空心楼盖具有以下优越性：

(1) 层高不变前提下增加净空而提升建筑的品质，或者在净空不变的前提下减小楼层高度而降低结构造价。

(2) 室内无梁景观更美，视觉通畅无阻，更有利于通风采光；楼板上可以任意砌筑隔墙，实现了开间的任意分割；由于没有明梁的阻挡，板下各种管道安装非常方便，在节省安装费用的同时，安装效果也十分美观；LPM空心楼盖良好的隔声性能可以大大减少楼层间噪音的干扰。

(3) 地下车库一般都为超长结构，施加预应力后楼板不容易开裂且变形性能好，提升建筑的使用品质；而优良的隔热性能使得空调效果更好，在节省电费的同时使得建筑更加绿色环保。

LPM预应力无梁楼盖的一般构造要求：1) 在柱上设置一道暗梁；2) 柱周围也设置一圈实心区，若柱尺寸较小或者冲切力太大还应加柱

表5 银丰广场不同结构形式经济性能比较(按2014年造价)

楼盖形式	钢筋(kg)	预应力筋(kg)	混凝土(m <sup>3</sup> )	模板(m <sup>2</sup> )	结构层高(mm)	造价(元/m <sup>2</sup> )
密肋梁结构	35.91	0.00	0.211	1.62	700	360.09
预应力空心板	26.75	3.53	0.209	1.00	350	403.65

表6 楼盖造价修正比较

楼盖形式	计算造价(元/m <sup>2</sup> )	高度修正值(元/m <sup>2</sup> )	修正造价(元/m <sup>2</sup> )	修正价差(元/m <sup>2</sup> )
密肋梁结构	360.09	63.00	423.09	
无梁空心板	403.65	0.00	403.65	-19.44



帽; 3) 暗梁周围弯矩、剪力较大区域, 将多根轻质管组合成单元顺暗梁方向布置, 其余区域布置填充箱 (见图11)。

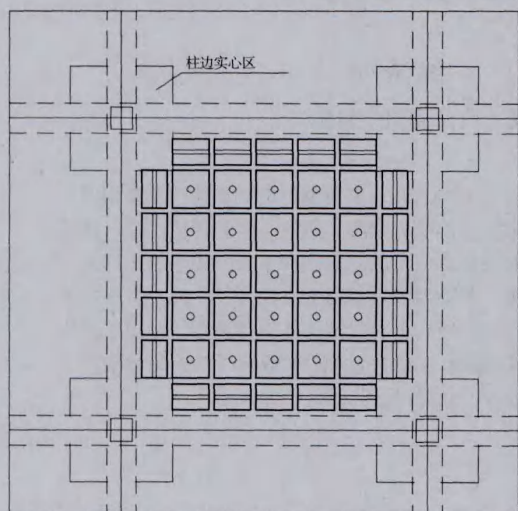


图11 LPM预应力无梁楼盖填充材料平面布置示意图

#### 4.2 典型工程介绍

##### (1) 光华路SOHO地下夹层

光华路SOHO地下夹层为了最大限度降低结构高度, 采用了LPM无梁预应力空心板。该工程最大柱网尺寸为8.4m×8.4m, 柱周围圈实心区尺寸为2500mm×2500mm, 没有加柱帽 (见图12)。空心板厚度250mm, 柱上板带暗梁尺寸为800mm×250mm, 楼盖折算的体积空心率为29.6%。

#### 4.3 相关经济性指标

##### (1) 8.4m×8.4m柱网车库顶板有覆土和消

防车通道。

条件: 覆土1.5m, 30.0kN/m<sup>2</sup>; 使用活载: 20.0kN/m<sup>2</sup>

取柱网中跨, 分别给4种结构形式, 结果见表7:

层高相等时, 无梁楼盖的使用净空显然更高。为了量化比较, 当净空相等时主次梁结构的竖向构件、挖土、降水等造价显然要增高, 同时考虑结构自重对其它构件的造价影响, 须对楼盖造价进行修正, 结果见表8:

##### (2) 8.4m×8.4m柱网人防层顶板

条件: 面层与吊顶: 3.0kN/m<sup>2</sup>, 人防等效静载: 50.0kN/m<sup>2</sup>; 使用活载: 5.0kN/m<sup>2</sup>

取柱网中跨, 分别给4种结构形式, 结果见表9:

按前述原则, 根据结构高度和自重的影响, 对楼盖造价进行修正, 结果见表10:

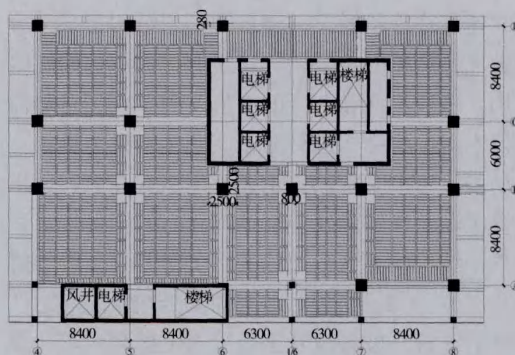


图12 光华路SOHO地下夹层局部平面图

表7 结构形式比较

楼盖形式	钢筋 (kg)	混凝土 (m <sup>3</sup> )	模板 (m <sup>2</sup> )	结构层高 (mm)	每平方米造价 (元)
主次梁结构	70.49	0.352	1.66	1000	565.26
普通无梁实心板	62.41	0.490	1.00	450	545.36
普通无梁空心板	53.85	0.339	1.00	500	536.98
预应力无梁空心板	36.11	0.330	1.00	500	530.23

表8 楼盖造价修正

楼盖形式	计算造价 (元/m <sup>2</sup> )	高度修正值	重量修正值	修正造价 (元/m <sup>2</sup> )	修正价差 (元/m <sup>2</sup> )
主次梁结构	565.26	72.00	0.00	637.26	0.00
普通无梁实心板	545.36	-50.00	15.68	511.04	-126.22
普通无梁空心板	536.98	-47.50	-1.47	488.01	-149.25
预应力无梁空心板	530.23	-47.50	-2.50	480.23	-157.03

(下转第34页)



图34 工程照片



图37 工程照片

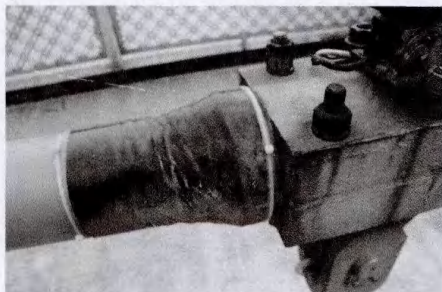


图35 工程照片



图36 工程照片

## 9 结论

目前, 虽然还没有实际工程采用可换式主缆结构, 但经过以上一系列结构设计和试验研究, 采用化整为零的方法, 将悬索桥主缆由原来单根设计成多根小主缆, 可逐根拆装更换小主缆, 从而实现悬索桥的主缆可更换。因此在中小型悬索桥上实现主缆的可更换, 可使主缆小型化, 使主缆的制作和运输更加方便, 施工机具小型化, 施工、维修方便, 适合山区及交通不便地方建造中小型悬索桥使用。

### 参考文献

- [1] 中交公路规划设计院有限公司等. 《特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南》(报批稿) 2010年10月
- [2] 雷俊卿等. 悬索桥设计[D]. 人民交通出版社, 2002
- [3] 柳州铁路工程质量检测中心有限公司. 主缆可换索式悬索桥索夹试验报告, 2012年9月

(上接第15页)

表9 结构形式比较

楼盖形式	钢筋 (kg)	混凝土 (m <sup>3</sup> )	模板 (m <sup>2</sup> )	结构层高 (mm)	每平方米造价 (元)
主次梁结构	59.67	0.352	1.68	1000	523.63
普通无梁实心板	52.77	0.460	1.00	450	493.17
普通无梁空心板	40.48	0.342	1.00	500	480.54
预应力无梁空心板	31.20	0.338	1.00	500	471.45

表10 修正结果比较

楼盖形式	计算造价 (元/m <sup>2</sup> )	高度修正值	重量修正值	修正造价 (元/m <sup>2</sup> )	修正价差 (元/m <sup>2</sup> )
主次梁结构	523.63	72.00	0.00	595.63	0.00
普通无梁实心板	493.17	-50.00	14.60	457.77	-137.86
普通无梁空心板	480.54	-47.50	0.59	433.63	-162.00
预应力无梁空心板	471.45	-47.50	0.12	424.07	171.56

## 5 结语

在合适的部位将现浇楼盖这一新兴技术与预应力这一传统技术有机结合起来, 往往能达到出人意料的技术效果, 从已经完成的包括奥运工程

在内的诸多工程的各项指标看, 预应力空心楼盖技术的经济效益和社会效益十分明显, 相信今后有更多的工程会采用这一新技术。