

# 中国钢筋混凝土空间网格结构 新体系的开拓与发展(下)

马克俭, 张华刚, 肖建春, 卢亚琴

(贵州大学空间结构研究中心, 贵阳 550003)

[摘要] 钢筋混凝土空间网格结构包括平板型的空腹网架结构、空腹夹层板结构、空腹双重网格结构、现浇混凝土空心大板楼盖结构。这些新型结构体系从20世纪80年代至今在跨度18~32 m公共建筑的屋盖和楼盖应用达100多万平方米,取得很好的社会与经济效益。有的已编制了相应的技术规程。我们研制了将钢筋混凝土空腹夹层板单向弯曲形成的钢筋混凝土空腹夹层网壳和网拱结构,双向弯曲形成的钢筋混凝土空腹夹层双曲扁网壳结构。这些拥有我国自主知识产权的空间网格结构新体系,均具有自身的特点和对建筑物的适应性,文章将按研制时间先后逐一介绍。其结构的“安全、合理、经济、先进”性,则通过工程实例予以剖析。

[关键词] 钢筋混凝土;空腹夹层板;现浇混凝土空心大板;网架结构;网壳结构

[中图分类号] TU375 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)08-0022-13

## 4.3.3 试验结论

对蜂窝形双重网格结构的1/3缩尺模型试验和两种分析方法的对比分析,可得如下结论:

1) 在竖向荷载作用下,双重网格结构具有一般空腹夹层板的力学特性,结构仍为考虑剪切变形而以弯曲变形为主的“夹芯板”的力学模型,结构的塑性区域与破坏形式与一般周边简支承实心平板相近,不会出现脆性破坏,结构延性好;

2) 虽然双重网格结构下部网格稀疏,但结构整体性和整体刚度均较好,竖向荷载传递按刚度分配规律法则明显,具有板的空间三维受力特点;

3) 双重网格结构极限承载力大,双重网格结构的实用分析方法安全可靠,工程设计中采用快捷、简单、现行软件可完成计算与施工图绘制全过程;

4) 钢筋混凝土双重网格结构用于跨度 $18\text{ m} \leq L \leq 36\text{ m}$ 的单层、多层楼盖结构,除了结构整体刚度、耐久性、防火、防腐蚀性优于钢结构外,其丰富的上、下肋网格造型也别具一格,节省大量吊顶装修费用。

## 5 大柱网多、高层建筑现浇混凝土空心楼盖结构

住房和城乡建设部早已提出“对多、高层建筑采用大柱网灵活划分房间,多功能应用”的要求,而现行框架-剪力墙结构体系,要做到大柱网( $a \geq 7.2\text{ m}$ )除框架梁外,根据房间划分,离不开中间梁,即“有墙处必有梁”,不利于多功能灵活划分房间,也不利于在大柱网内任意布置房间,于是出现了广州国际大厦,跨度达9 m以上的无粘结预应力混凝土大板新工艺,从而使大板结构自重下降1.5%~20%。20世纪末21世纪初出现的大柱网现浇混凝土空心楼盖结构,在确保结构刚度和强度条件下,使大板结构自重下降30%~40%,同时也免去了较费时费工的预应力工艺,达到在空心大板上灵活划分房间多功能应用的目的,并先后出现了两种现浇混凝土空心大板楼盖的专利技术,即“GBF”专利技术和“CA-CSP”专利技术。

[收稿日期] 2008-04-30

[作者简介] 马克俭(1933-),男,湖南岳阳市人,中国工程院院士,贵州大学教授,贵州省勘察设计大师

## 5.1 两种专利技术的制管工艺、构造与结构布置方法

### 5.1.1 “GBF”管制管的工艺及管的构造及结构布置特点

1) “GBF”管构造特点。“GBF”管称为高强复合薄壁管,由水泥胶凝材料、玻璃纤维网格布、粉煤灰漂珠形成内部空腔,两端再加堵头,长度在 1.5 ~ 2 m 左右的薄壁管,如图 31 所示。

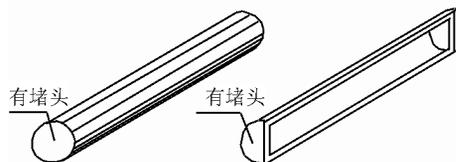


图 31 GBF 管构造

Fig. 31 The configuration of GBF pipe

2) “GBF”管结构布置特点。“GBF”管布管沿板跨短方向一段一段布置,中间空 200 ~ 250 mm 形成暗梁,图 32(a) 为布管平面图,图 32(b)、(c) 分别为垂直管方向剖面和平行管方向剖面图。

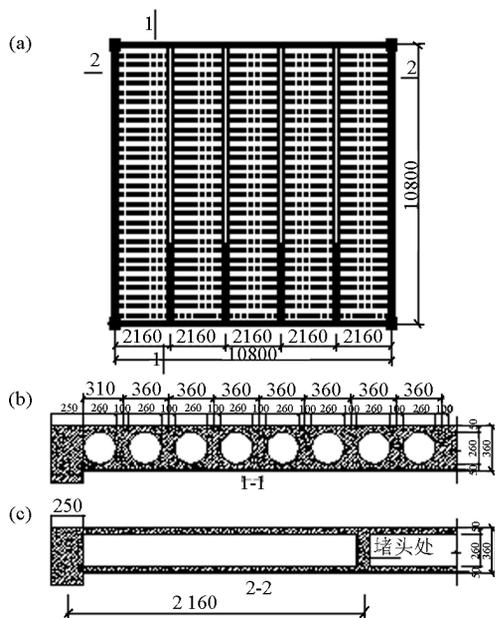


图 32 GBF 管

Fig. 32 The GBF pipe

### 5.1.2 “CA - CSP”管工艺、构造与结构布置方法

1) “CA - CSP”管构造特点。“CA - CSP”管称为石棉水泥砂浆离心管,它利用“离心成型”原理制成,其构造特点是开口薄壁,布管时只在框架梁的侧壁加堵头,一般管如图 33 所示。两者在构造上截然不同,如 9 m 跨板,板厚 300 mm,管径 200 mm,壁厚

5 mm,自重 6.1 kg/m,吸水率 6.2%,抗折极限荷载 150 kg/m,确保施工顺利进行。



图 33 水泥砂浆开口薄壁管

Fig. 33 The cement mortar aperture thin walled tube

2) “CA - CSP”的结构布管方式。“CA - CSP”管布管沿板短跨方向布置,长 1.5 ~ 2 m,一根接一根,接头处由“模管管卡”(ZL2004 20033534.6)连接,其作用有三:其一,防止混凝土注入管内;其二,起到管底部的垫块作用,留出保护层厚度;其三,管卡与下部竹胶板用铁钉固定,防止浇筑混凝土时浮力使管上浮。图 34 分别为布管图及沿板垂直方向和顺管方向剖面图,图 35 为实际工程管与管接头处“模管管卡”工程实录。

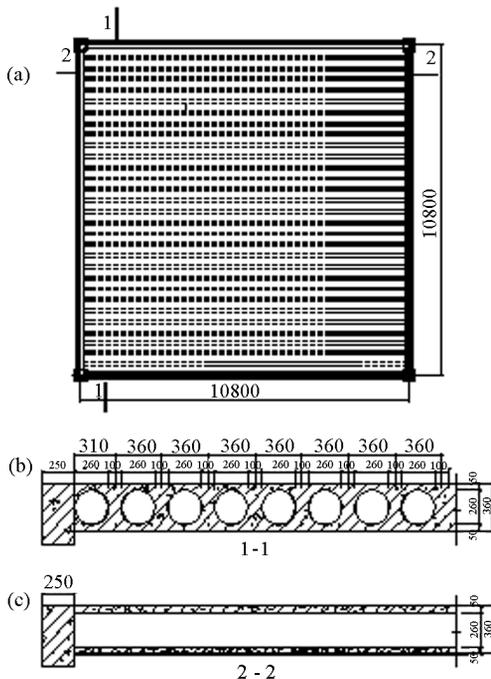


图 34 CA-CSP 管

Fig. 34 The CA-CSP pipe

## 5.2 现浇混凝土单向空心大板的力学特点

此类现浇混凝土单向空心大板主要应用于大柱网多层与高层建筑的楼盖结构,除框架梁或框架扁梁外,无大板中间任何梁(中间梁或十字梁井字

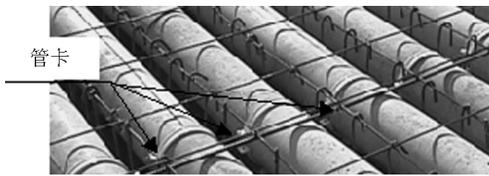


图 35 模管管卡实物照

Fig. 35 The object illuminates of the card of mold tube

梁),从而形成“现浇混凝土框架空心大板结构”和“现浇混凝土框架空心大板-剪力墙结构”。此类单向空心大板的力学特点主要体现在三维空间受力,而具有正交异性受力特点。

### 5.2.1 构造上的正交异性

从图 34(b)和图 34(c)两个正交剖面可以看出两个方向的单位抗弯刚度不相等,即  $I_x \neq I_y$ ,如图 36 所示,同时两个方向一为工字形截面单位抗剪刚度为无穷大,另一方向为空腹式截面,其单位抗剪刚度为有限,从而使此类空心大板形成“构造上的正交异性”,有别于一般钢筋混凝土实心平板。

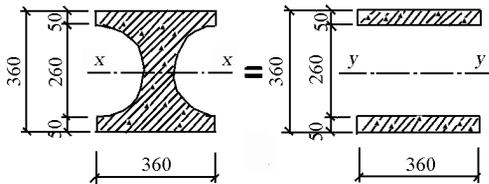


图 36 抗弯刚度计算简图

Fig. 36 The calculation diagram

### 5.2.2 四点支承时柱上板带相邻各点内力变化梯度很大

空心大板四角的钢筋混凝土柱(或框架柱)对空心大板柱上板带区域每一条板带的刚度约束是不同的。离柱越近约束越大,离柱较远处约束减小显著,且柱上板带宽度范围内,约束程度的大、小变化梯度很大。以往无梁楼盖将柱上板带等效为框架梁,当求出框架梁的支座负弯矩后,平均配置负弯矩钢筋,这将导致柱上板带宽度范围内,离柱较远处配筋量不足,甚至相差 1 倍以上,而离柱远处负钢筋又配置太多。这是点支承板柱结构内力分布规律的特性。有的设计者在此处采用增加 50% 的负弯矩钢筋来处理,经分析靠近柱轴线区域负弯矩钢筋仍少 50%,而离柱轴线较远处板带负弯矩钢筋本来已多配,现又增加 50%,造成更大的浪费。采用这种方法设计的大柱网多、高层建筑的结构用钢量,超出常

规框架结构用钢量 30% ~ 40%。这是没有掌握“柱上板带内力变化梯度大规律”所带来的弊端。

## 5.3 周边简支承现浇混凝土空心大板连续化分析方法

在第一节与第二节我们分别讨论了周边简支承的空腹网架结构和空腹夹层板楼盖的连续化分析方法,它们均是以“考虑剪切变形的‘拟夹层板’为力学模型”,同时大部分具有“两向正交同性的特点”,所不同的是空腹网架剪切刚度较差,构造上不考虑面板参加工作,其计算参考面在空腹网架的空腹中性层,基本方程为两个偏微分方程组,空腹夹层板抗剪刚度较大,构造上考虑面板参加工作,其计算参考面在上表层,为非对称形式,其基本方程为一个十阶偏微分方程。空心大板同样具有“夹芯板”的力学模型,但为“构造上的正交异性”,本文连续化分析为此类结构建立理论基础。

### 5.3.1 计算基本假定

将现浇空心板的芯管顶(和底)部分看作连续体的上、下表层,将芯管间密肋梁等代连续体的夹芯层,夹芯层的剪切刚度考虑了上、下表层刚度的贡献,采用具有三个广义位移的非经典平板理论来建立求解现浇混凝土空心板的基本方程。现浇混凝土空心板的构造及坐标系如图 37 所示, $xz$  平面为密肋向平面, $yz$  平面为空腹向平面。基本计算假定为

1) 现浇空心板的计算中面为密肋梁中面,在  $xz$  平面内,变形前垂直于中面的直法线,变形后仍然垂直于中面;在  $yz$  平面内,变形前垂直于中面的直法线变形后不再垂直于中面,而是旋转了一个角度  $\theta_0$ 。

2) 芯管顶和底部厚度远小于密肋梁的高度,将其看作连续体的上、下表皮,承受空心板平面内力。

3) 将芯管间密肋梁看作连续体的夹芯层,承受空心板的横向剪力,但空腹向的剪切刚度考虑表层薄板的影响。

### 5.3.2 空腹向等代剪切刚度

忽略空腹向孔洞处的变截面影响,将其简化为规则横向框架,框架高度取至上、下表皮形心,取折算单元如图 37(a)所示,单位横剪力作用下,折算单元的弯矩图如图 38(b)所示,上、下表皮的相对位移可由图乘得到:

$$\delta = \frac{a_y^2 (2i_1 + i_2)}{24i_1 i_2} \quad (23)$$

则横向剪切角为

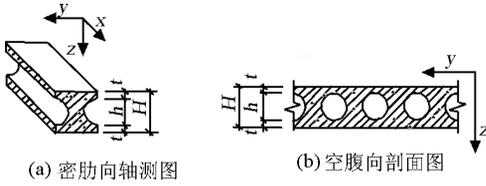
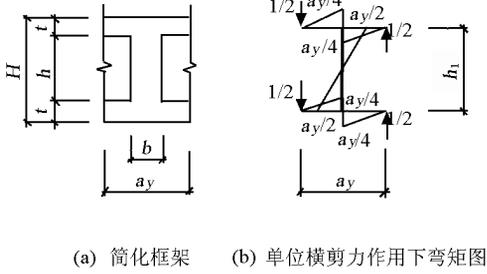


图 37 现浇混凝土空心板计算简图

Fig. 37 The calculation diagram of cast-in-place concrete round eye hollow plate



(a) 简化框架 (b) 单位横剪力作用下弯矩图

图 38 剪切刚度计算简图

Fig. 38 The calculation diagram of the shear stiffness

$$\gamma = \frac{\delta}{a_y} \quad (24)$$

因而空腹向等代剪切刚度为

$$C = \frac{24i_1 i_2}{a_y (2i_1 + i_2)} \quad (25)$$

式中,  $i_1$  为上(或下)表皮单位宽度抗弯刚度;  $i_2$  为密肋梁纵截面单位宽度抗弯刚度;  $a_y$  为芯管间距。

### 5.3.3 几何方程

由基本假定(5.3.1), 可知密肋向平面的剪切刚度为无穷大, 几乎不产生剪应变, 即有  $xz$  平面的剪应变  $\gamma_{xz} = 0$ , 故有

$$\theta_x = \frac{\partial w}{\partial x}$$

而  $yz$  平面需考虑非均匀剪切变形影响, 故其剪应变为

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_y$$

上、下表层应变为

$$\varepsilon_x^{\pm} = \mp \frac{h+t}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon_y^{\pm} = \mp \frac{h+t}{2} \frac{\partial \theta_y}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy}^{\pm} = \mp \frac{h+t}{2} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right]$$

式中,  $\varepsilon_x^+$ ,  $\varepsilon_y^+$  和  $\gamma_{xy}^+$  为上表层应变;  $\varepsilon_x^-$ ,  $\varepsilon_y^-$  和  $\gamma_{xy}^-$  为下表层应变;  $w$  为空心板挠度;  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  为中面直法线在

$xz$  和  $yz$  平面内的转角;  $t$  为上、下表层厚度;  $h$  为芯管间密肋梁高度。

### 5.3.4 物理方程

上、下表层的平面力:

$$N_x^{\pm} = \mp \frac{Et}{1-\mu^2} \frac{h+t}{2} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right] \quad (26a)$$

$$N_y^{\pm} = \mp \frac{Et}{1-\mu^2} \frac{h+t}{2} \left[ \frac{\partial \theta_y}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \quad (26b)$$

$$N_{xy}^{\pm} = \mp \frac{E}{2(1+\mu)} \frac{h+t}{2} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right] \quad (26c)$$

整体弯矩和空心板扭矩由表层平面力合成为

$$M_x = -D \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right] \quad (27a)$$

$$M_y = -D \left[ \frac{\partial \theta_y}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \quad (27b)$$

$$M_{xy} = -D \frac{1-\mu}{2} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right] \quad (27c)$$

上述各式中,  $\mu$  为泊松比,  $D$  为空心板抗弯刚度, 按式(28)计算:

$$D = \frac{Et}{1-\mu^2} \frac{(h+t)^2}{2} \quad (28)$$

由于密肋向几乎不产生剪应变, 故密肋向横剪力不能由应变直接求出, 而空腹向横剪力为

$$Q_y = C \left[ \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_y \right] \quad (29)$$

式(29)中,  $C$  为空腹向等代剪切刚度, 按式(25)计算。

### 5.3.5 平衡方程

空心板平衡方程为

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0 \quad (30a)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - Q_y = 0 \quad (30b)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - q = 0 \quad (30c)$$

### 5.3.6 基本方程

将式(27a)和式(27c)代入平衡方程(30a)式可得密肋向横剪力为

$$Q_x = -D \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{1-\mu}{2} D \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} - D \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x \partial y} \quad (31)$$

将式(27b)、式(27c)和式(29)代入平衡方程(30b)式可得

$$D \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial y^2} + \frac{1+\mu}{2} D \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} + \frac{1-\mu}{2} D \frac{\partial^2 \theta_y}{\partial x^2} + C \left[ \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_y \right] = 0 \quad (32)$$

由平衡方程式(30c)可得

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{1-\mu}{2} D \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1+\mu}{2} D \frac{\partial^3 \theta_y}{\partial x^2 \partial y} - C \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right] = q \quad (33)$$

引入新的位移函数  $\varphi$ , 将挠度和转角函数表示为

$$w = \varphi - \frac{D}{C} \left[ \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right] \quad (34)$$

$$\theta_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{D}{C} \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^2 \partial y} \quad (35)$$

可满足式(32), 将其代入式(33)中, 可得求解现浇空心板的基本方程:

$$D \nabla^4 \varphi - \frac{1-\mu}{2C} D^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\nabla^4 \varphi) = q \quad (36)$$

可见, 当空腹向剪切刚度无穷大时(填充空心孔洞),  $w = \varphi$ , 式(34)退化为薄板弯曲问题的基本方程。在相应边界条件下求解出位移函数  $\varphi$  后, 即可得现浇空心板的相应位移和内力。

### 5.3.7 矩形平面周边简支边界条件下的解

图 39 所示矩形平面周边简支空心板,  $x$  向为密肋向,  $y$  向为空腹向, 构造如图 37 所示, 相应边界条件为

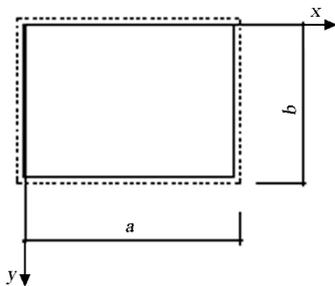


图 39 现浇空心板平面图

Fig. 39 Horizontal plan of the cast-in-place roundeye hollow plate

$x=0$  和  $x=a$  边:  $w=0; \theta_y=0; M_x=0$ 。

$y=0$  和  $y=b$  边:  $w=0; \theta_x=0; M_y=0$ 。设位移函数  $\varphi$  为如下重三角级数:

$$\varphi = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad (37)$$

易知其满足上述全部边界条件, 将其代入基本方程(36)中, 有

$$D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \pi^4 \left[ \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^2 \left[ 1 + \frac{D}{C} \frac{1-\mu}{2} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \right] = q \quad (38)$$

将  $q$  也展为重三角级数:

$$q = \frac{4}{ab} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \int_0^a \int_0^b q \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} dx dy \right] \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad (39)$$

代入式(36)中, 并比较两边的系数项, 有

$$A_{mn} = \frac{\frac{4}{ab} \left[ \int_0^a \int_0^b q \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} dx dy \right]}{D \pi^4 \left[ \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^2 \left[ 1 + \frac{D}{C} \frac{1-\mu}{2} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \right]} \quad (40)$$

当荷载  $q$  为常量时, 注意到:

$$\int_0^a \int_0^b q \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} dx dy = \frac{qab}{\pi^2 mn} [1 - \cos m \pi] [1 - \cos n \pi] \quad (41)$$

有:

$$A_{mn} = \frac{16q}{D \pi^6 \Delta_{mn}}, [m=1, 3, 5, \dots; n=1, 3, 5, \dots] \quad (42)$$

其中

$$\Delta_{mn} = mn \left[ \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^2 \left[ 1 + \frac{D}{C} \frac{1-\mu}{2} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \right] \quad (43)$$

即得位移函数  $\varphi$  的表达式为

$$\varphi = \frac{16q}{D \pi^6} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{\Delta_{mn}} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad (44)$$

则可得现浇空心板的三个广义位移分别为

$$w = \frac{16q}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\Delta_{mn}^w}{\Delta_{mn}} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad (45)$$

$$\theta_x = \frac{16q}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\Delta_{mn}^{\theta_x}}{\Delta_{mn}} \cos \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \quad (46)$$

$$\theta_y = \frac{16q}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\Delta_{mn}^{\theta_y}}{\Delta_{mn}} \sin \frac{m \pi x}{a} \cos \frac{n \pi y}{b} \quad (47)$$

其中

$$\Delta_{mn}^w = 1 + \frac{D}{C} \frac{1-\mu}{2} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{D}{C} \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \quad (48a)$$

$$\Delta_{mn}^{\theta_x} = \Delta_{mn}^{\theta_y} = \frac{m \pi}{a} \quad (48b)$$

$$\Delta_{mn}^{\theta_y} = \frac{n\pi}{b} \left[ 1 - \frac{D}{C} \frac{1+\mu}{2} \frac{m^2\pi^2}{a^2} \right] \quad (48c)$$

现浇空心板整体弯矩和扭矩分别为

$$M_x = \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\Delta_{mn}^w \frac{m^2\pi^2}{a^2} + \Delta_{mn}^{\theta_y} \mu \frac{n\pi}{b}}{\Delta_{mn}} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (49a)$$

$$M_y = \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\Delta_{mn}^w \mu \frac{m^2\pi^2}{a^2} + \Delta_{mn}^{\theta_y} \frac{n\pi}{b}}{\Delta_{mn}} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (49b)$$

$$M_{xy} = -\frac{1-\mu}{2} \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\frac{m\pi}{a} \left[ \Delta_{mn}^w \frac{n\pi}{b} + \Delta_{mn}^{\theta_y} \right]}{\Delta_{mn}} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \quad (49c)$$

空心板横剪力为

$$Q_x = \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{m\pi}{a\Delta_{mn}} \left[ \Delta_{mn}^w \left( \frac{m^2\pi^2}{a^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{n^2\pi^2}{b^2} \right) + \frac{n\pi}{b} \frac{1+\mu}{2} \Delta_{mn}^{\theta_y} \right] \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (50a)$$

$$Q_y = \frac{C}{D} \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\Delta_{mn}^w \frac{n\pi}{b} - \Delta_{mn}^{\theta_y}}{\Delta_{mn}} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \quad (50b)$$

空心板的上、下表层平面力可由整体弯矩除以计算高度得到。

钢筋混凝土现浇单向空心板,从构造而言,密肋向和空腹向单位宽度内其抗弯和抗剪刚度不等,密肋向类似于实心平板受力,可不考虑其剪切变形的影响,而空腹向类似于框架受力,分析时需考虑非均匀剪切变形的影响,为简化问题分析而对空心板所作的计算假定符合其受力特点,当空腹向的剪切刚度也趋于无穷大时,前述的基本方程(36)可退化为实心平板的基本方程。

## 5.4 现浇混凝土单向空心大板几种计算方法

### 5.4.1 现浇混凝土单向空心大板的矩形网格板法

对于钢筋混凝土实心大板要进行较精确的有限元分析,可将板划分若干个网格,直接采用“板壳单元”的有限元分析方法称之为“网格板法”,若将网格板利用折算抗弯刚度等效原理,折算为网格梁称

之为“网格梁法”,由于平板抗剪刚度为无穷大,变形为“弯曲型”,同时此类空间板具有“各向同性”特性,划分的网格为正方形,网格越密,精度越高。现浇混凝土空心大板由于其单向空心构造造成其“正交异性”特性,加之其构造上一个方向为工字形密肋梁与之正交的另一个方向形成空腹密肋梁,此用较精确的有限元分析方法其网格划分即以两根密肋工字梁之间距  $a_y$  为单位,利用折算抗弯刚度等效原理,可求出单位抗弯刚度较差的空腹梁的网格尺寸  $a_x$ ,自然  $a_x > a_y$ ,即形成“矩形网格板”,如图 40 所示。

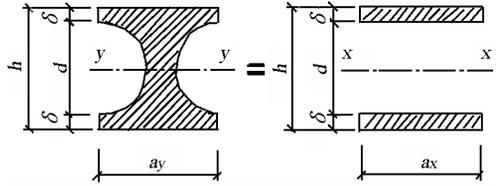


图 40 现浇空心板截面图

Fig. 40 Section of the cast-in-place round eye hollow plate

### 5.4.2 现浇混凝土单向空心大板的“综合刚度法”

“矩形网格板法”如用“ANSYS”方法一样,可以达到摸清现行空心大板的变形与内力分布规律和力学特性作用,由于其一块大板的计算单元太多,而实际工程每层楼面有若干块大板,未知量过大,而且施工配筋图上的分区配筋太小,是不符合施工要求的。但“矩形网格板法”揭示空心板大板的变形与内力分布规律。下面两个实用的有限分析方法即根据“矩形网格板法”得出的变形与内力分布规律提出的简化计算方法。

1) 计算基本假定: a. 结构计算在线弹性范围。 b. 利用抗弯刚度等效原则,将两正交方向对应的工字梁和空腹梁折算为矩形截面梁( $b \times h$ )。 c. 在柱上板带中内力变化梯度较陡的部位,采用既分离又综合的方法,靠框架梁最近的第①、②根梁截面叠加。再第③、④、⑤、⑥根梁叠加,跨中板带两正交的梁分别各自叠加,形成不规则网格的交叉梁系(见图 40)。 d. 采用内力增大系数。对综合后的第一根梁乘  $\eta_1 = 1.2$ ,第二根梁乘增大系数  $\eta_1 = 1.15$ 。

根据计算假定形成“综合刚度法的交叉网格梁”,利用现行软件即可进行位移内力分析与配筋计算。

2) 综合刚度法柱网空心板网格划分:图 41 为  $8\text{ m} \times 8\text{ m}$  柱网,柱上板带按假定 c 叠加为两根,跨

中叠加为一根,从而形成 36 个网格,使复杂计算简单化。

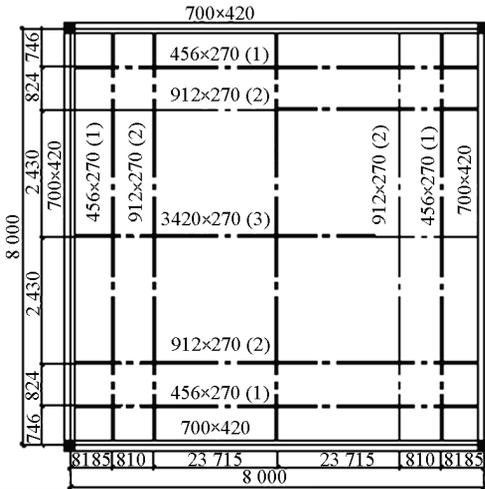


图 41 8 m × 8 m 综合刚度法网格梁布置图

Fig. 41 Arrangement of 8 m × 8 m grid beams in comprehensive rigidity method

### 5.4.3 现浇混凝土空心大板的“归并法”

1) 计算基本假定: a. 结构计算在线弹性范围。 b. 利用抗弯刚度等效原则,将两正交两个方向的工字梁与空腹梁截面折算为矩形截面梁  $b \times h$ 。 c. 在柱上板带离框架梁最近的第一根梁分开,第②、③根梁叠加,第④、⑤、⑥根梁叠加,剩下的均综合为中间梁,形成不规则的网格的交叉梁系。归并法计算基本假定与综合刚度法基本相同,因为将梯度变化级差大的第一根梁分开,其他大幅度减小级差,此方法无需再乘弯矩增大系数  $\eta_i$ 。

2) 归并法网格划分: 图 42 为 8 m × 8 m 柱网,按假定 c 柱上板带划分三根梁,跨中板带仍为一根,形成 64 个网格,网格虽然比综合刚度法多,但精度高,配筋时亦不用乘增大系数  $\eta_i$ 。

## 5.5 大柱网现浇混凝土单向空心大板工程实例

### 5.5.1 贵州世贸广场双塔建筑( $4.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ )

2003 年,该建筑采用“大柱网(7.8 m × 8.2 m、7.8 m × 10.5 m)框架-剪力墙结构”,2004 年施工基础地下室前,采用新技术“大柱网现浇混凝土空心大板框架扁梁-剪力墙结构”。其优点: a. 施工进度比原结构提前 5 个月; b. 混凝土折算厚度比原设计( $25.2 \text{ cm/m}^2$ )下降  $5.4 \text{ cm/m}^2$ ,节约混凝土  $2592 \text{ m}^3$ ; c. 用钢量比原设计( $74.2 \text{ kg/m}^2$ )下降  $21.2 \text{ kg/m}^2$ ,节约钢材 1 017 t; d. 大柱网灵活划分房间,多功能应用; e. 结构层高由原 3.4 m 改为

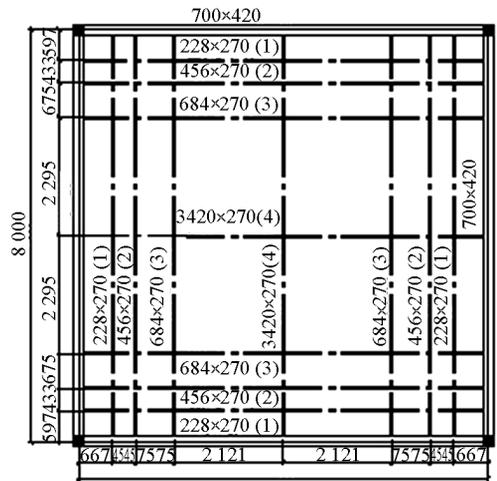


图 42 归并法网格梁布置图

Fig. 42 Arrangement of grid beams in combination method

3.2 m, 24 层节约 4.8 m 后增加两层(26 层); f. 节约造价 2 000 万元(不含增加两层销售价)。图 43 双塔建筑 A 塔标准层平面的现浇空心大板框架扁梁及剪力墙结构布置图,空心板厚  $h = 280 \text{ mm}$ ,沿短跨布置。图 44 为该工程布管及配筋后浇混凝土之前工程实录,图 45 为该建筑近期外景实录。

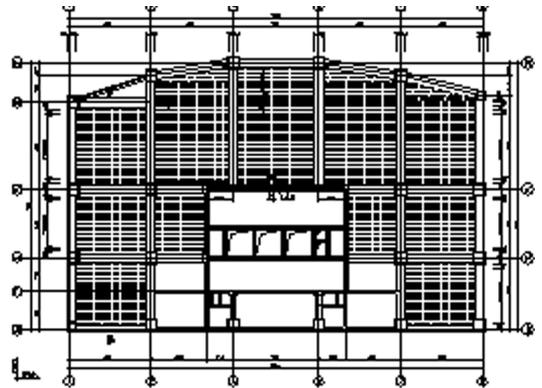


图 43 结构布置图

Fig. 43 Structure general arrangement

### 5.5.2 新疆库尔勒市“南疆国际购物广场高层住宅”(23 层, $3.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ )

2004 年已设计为“框架-剪力墙结构”后改为“大柱网(7.6 m × 8.1 m)现浇混凝土空心大板楼盖框架扁梁-剪力墙结构体系”。2005 年 6 月施工,2006 年 8 月竣工,这阶段新疆有 4 个月冰冻期,即 8 个月完成结构工程( $3.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ )。与原设计比较有如下优点: a. 施工进度提前 3 个月; b. 混凝土折算



图 44 工程实录

Fig. 44 Record of the project



图 45 工程实录

Fig. 45 Record of the project

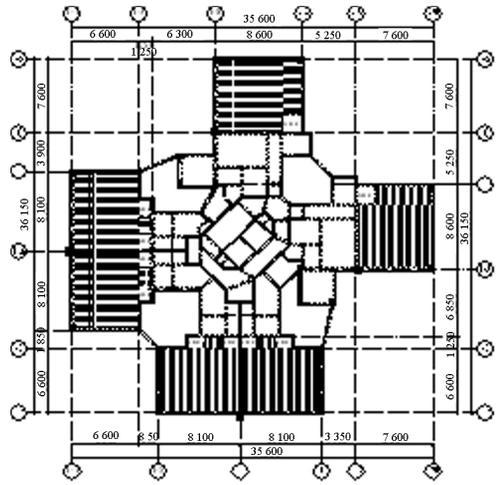


图 46 结构布置图

Fig. 46 Structure general arrangement



图 47 效果图

Fig. 47 Effect chart

实录,图 49 为该建筑群效果图,图 50 为该工程近期实录。

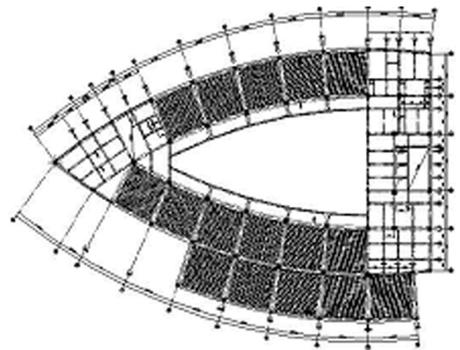


图 48 结构布置图

Fig. 48 Structure general arrangement

厚度比原设计 ( $24.3 \text{ cm/m}^2$ ) 下降  $4.3 \text{ cm/m}^2$ , 节约混凝土 (C30)  $1\ 634 \text{ m}^3$ ; c. 用钢量比原设计 ( $78 \text{ kg/m}^2$ ) 下降  $27 \text{ kg/m}^2$  节约钢材  $1\ 026 \text{ t}$ ; d. 大开间、自由分隔房间, 卖点增大; e. 综合造价节约 450 万元, 图 46 为楼层空心管布置图, 图 47 为该工程建成后效果图。

#### 5.5.2 中国水电集团贵阳水电勘察设计科研大楼 (9 层, $3.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ )

该建筑为水电设计院在金阳高新区新建大楼, 原设计为“框架结构”。2005 年 6 月改为“大柱网 ( $8 \text{ m} \times 8.2 \text{ m}$ ) 现浇混凝土空心大板楼盖结构” ( $3.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ) 与原设计比较有如下优点: a. 施工进度提前 3 个月; b. 混凝土折算厚度由原设计 ( $\delta = 23.8 \text{ cm/m}^2$ ) 下降  $4.6 \text{ cm/m}^2$ , 节约混凝土 (C30)  $1\ 470 \text{ m}^3$ ; c. 用钢量比原设计 ( $77.8 \text{ kg/m}^2$ ) 下降  $28.2 \text{ kg/m}^2$ , 节约钢材  $902 \text{ t}$ ; d. 办公楼自由划分房间, 克服框架结构“有墙必有梁”缺点; e. 每平方米节约单价 120 元, 节约造价 384 万元, 图 47 为标准层左侧空心管布置图, 图 48 为结构脱模后室内工程



图 49 工程实录

Fig. 49 Record of the droiect



图 50 效果图

Fig. 50 Effect chart



图 51 工程外景实录

Fig. 51 Record of the project

## 6 正、零高斯曲率钢筋混凝土空腹夹层网壳与网拱结构

### 6.1 正、零高斯曲率钢筋混凝土空腹夹层网壳与网拱的力学模型与结构组成

#### 6.1.1 力学模型

将以抗弯曲为主的空腹夹层板[见图 52(a)], 单向[见图 52(b)]或双向弯曲[见图 53(a)]形成以抗压为主的空腹夹层壳或空腹夹层拱结构[见图

53(b)]和空腹夹层柱面网壳[见图 53(c)]即力学模型由考虑剪切变形的“拟夹芯板”变为考虑剪力变形的“拟夹芯壳”和“拟夹芯拱”。

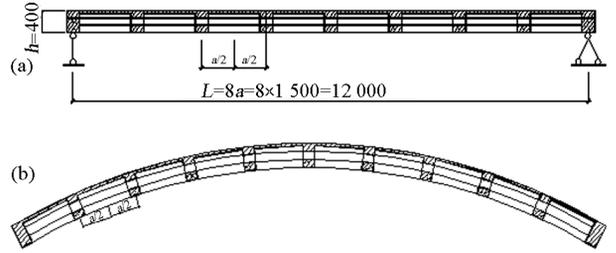
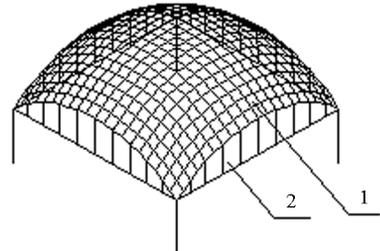
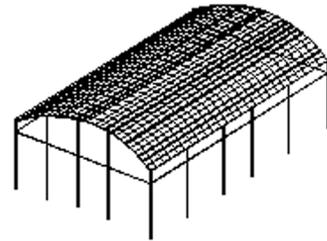


图 52 空腹夹层网壳与网拱结构

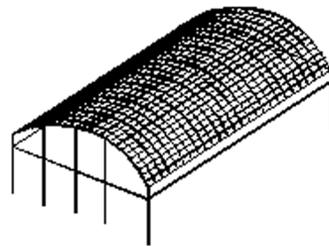
Fig. 52 Open - web sandwich shell and arch structure



(a) 空腹夹层双曲扁网壳



(b) 空腹夹层柱面网拱



(c) 空腹夹层柱面网拱

图 53 空腹夹层网壳与网拱结构轴测图

Fig. 53 axonometric chart of open - web sandwich shell and arch structure

#### 6.1.2 基本组成与构造

钢筋混凝土空腹夹层壳与空腹夹层拱结构的组成如同钢筋混凝土空腹夹层板一样,由上、下肋和剪力键及薄板组成。它由原来的“平板”在节点处弯折,形成以节点为曲率半径的双向或单向弯曲的壳或拱,即曲面由单向或双向折线组成,它们的构造也如同钢筋混凝土空腹夹层板结构。

图 52(b)和图 54 为这三类结构的剖面构造,其组成与构造与钢筋混凝土空腹夹层大板相同,其曲线是由每一个节点的曲率半径形成,每一节间仍为直线段,既有利于施工,也使模板简化。

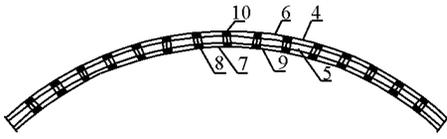


图 54 空腹夹层网壳与网拱剖面图

Fig. 54 Sectional drawing of open - web sandwich shell and arch structure

腹型截面折算为与空腹梁等高而宽度较空腹梁宽度较小的实心截面梁,从而形成带肋壳和带肋拱结构(见图 55),利用现行通用软件可求出变形和内力,再进行配筋设计。

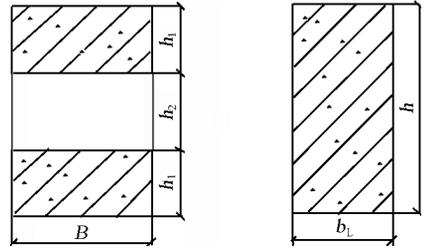


图 55 空腹梁折算截面图

Fig. 55 Equivalent section of the open - web beams

## 6.2 正、零高斯曲率钢筋混凝土空腹夹层网壳与网拱的力学特性

### 6.2.1 钢筋混凝土空腹夹层网壳与网拱结构有良好的抗压与抗弯性能

壳板和拱板轴心受压为其力系中主体,充分发挥混凝土材料优良的抗压性能,将钢筋混凝土薄壳改为钢筋混凝土空腹夹层网壳或网拱结构后,结构受力特性仍以抗压为主力系,而薄壳结构壳板由于边缘构件的影响产生单向或双向(角隅区)弯曲应力是靠增大壳板周边板的厚度 2~3 倍和增大抗弯钢筋数量来解决,而空腹夹层壳是由等厚度以抗弯曲为主要力系的钢筋混凝土空腹夹层板平面楼盖或屋盖单向或双向弯曲而成,无需变厚度,仅在上、下肋截面内调整钢筋数量。

### 6.2.2 钢筋混凝土空腹夹层网壳和网拱结构有良好的局部与整体稳定性能

正、零高斯曲率的钢筋混凝土薄壳和薄壁拱结构壳(拱)板的局部和整体稳定是结构的重要控制指标,如等曲率的双曲扁壳在法向荷载作用下,它的稳定由法向设计荷载值( $q_{nd}$ )控制即

$$q_{nd} \leq 0.06 E_c k^2 t^2 \quad (50)$$

而等曲率双曲扁壳板稳定表达式为

$$q_{nd} \leq 0.06 E_c k_1 k_2 t^2 \quad (51)$$

结构稳定与壳板弹性模量( $E_c$ ),壳板厚度( $t$ )及壳板曲率( $k$ )及两个方向中面主曲率( $k_1, k_2$ )成正比,采用空腹夹层网壳或网拱后,其混凝土折算厚度增大的同时其抗弯刚度( $E_c I$ )相应增大,其稳定性相对原薄壳而言大幅度提高。

## 6.3 钢筋混凝土空腹夹层网壳与网拱结构实用分析方法简介

实用分析方法与空腹夹层板楼盖的实用分析方法相近,即将空腹曲梁利用抗弯刚度等效原理,将空

其折算宽度表达式为

$$b_1 = B \left[ 1 - \left( \frac{h_2}{h} \right)^3 \right] \quad (52)$$

## 6.4 钢筋混凝土空腹夹层网拱结构工程实例

### 6.4.1 工程简介

中国水电顾问集团贵阳勘察设计院新地址坐落于贵阳市金阳高新区,新地址共分三个中心,即设计科研中心大楼,采用本文第 5 节新结构“大柱网现浇混凝土空心大板框架扁梁结构”。会议中心以 25 m × 38 m 会堂为主体的建筑,采用本文第 3 节新型结构“大跨度钢筋混凝土空腹夹层板屋盖结构”。健身中心的两大主要建筑,即温水游泳馆,平面尺寸 22.5 m × 35 m,采用本文第 2 节新型结构“钢筋混凝土装配整体式”四肢格构竖杆空腹网架结构;篮球馆平面尺寸 22.5 m × 37.5 m,采用“正交正放现浇混凝土空腹夹层网拱结构”。

### 6.4.2 正交正放现浇混凝土空腹夹层网拱结构简介

篮球馆周边柱网分别为两山墙面,柱网 3 × 7.5 m = 22.5 m(短跨方向),两长边 5 × 7.5 m = 37.5 m,网格水平投影尺寸沿曲面不相同,即 1 173 mm, 1 264 mm, 1 344 mm, …, 1 549 mm 共 16 格,沿直线网格均为 1 500 mm,即 25 × 1 500 = 37 500 mm,从而使圆柱面上网格尺寸均为 1 500 mm × 1 500 mm。图 56 为该结构柱网及空腹夹层网拱结构水平投影网格布置图,空腹夹层网拱结构矢高  $f = 4 500$  ( $f/l = 4 500/22 500 = 1/5$ )  $f = 4 500$  ( $f/l = 4 500/22 500 = 1/5$ ),拱壳计算高度  $\delta = 400$  ( $\delta/L = 400/2 200 = 1/16$ ),上、下肋截面 350 mm

×200 mm,空腹净高 200 mm,混凝土折算厚度为 200 mm/m<sup>2</sup>,若采用正交正放实腹截面拱,混凝土折算厚度 335 mm/m<sup>2</sup>。两者相差 135 mm/m<sup>2</sup>,空腹拱自重设计值相对下降 405 kg/m<sup>2</sup>。由于自重下降,其用钢量仅 44 kg/m<sup>2</sup>(未计柱及基础),比常规混凝土实腹梁网格拱用钢量(73.8 kg/m<sup>2</sup>)下降 29.8 kg/m<sup>2</sup>。两种结构在混凝土、钢材用量比较,空腹夹层网拱结构比实腹梁网拱结构的混凝土节约 114 m<sup>3</sup>(C30),钢材节约 26 t。由于室内形成空腹网格,有关薄壳结构造成室内音响不佳的情况在空腹

夹层网拱结构中不会出现。图 57(a)为空腹夹层拱结构剖面,结构采用圆曲线,曲率半径  $R = 16.3125$ ,夹角  $\alpha_1 = 5.45^\circ$ , $16\alpha_1 = 87.2^\circ$ 图 57(b)为空腹拱板构造配筋图。此项工程 2008 年 4 月完成土建结构工程,其结构轴测图如图 58 所示,图 59 为脱模后工程外景,此项结构属国家发明专利,为了进一步检验此项新型结构力学特性,近期将在现场进行静力超载试验(超使用荷载 200%),图 59 为脱模后现场室内工程实录。

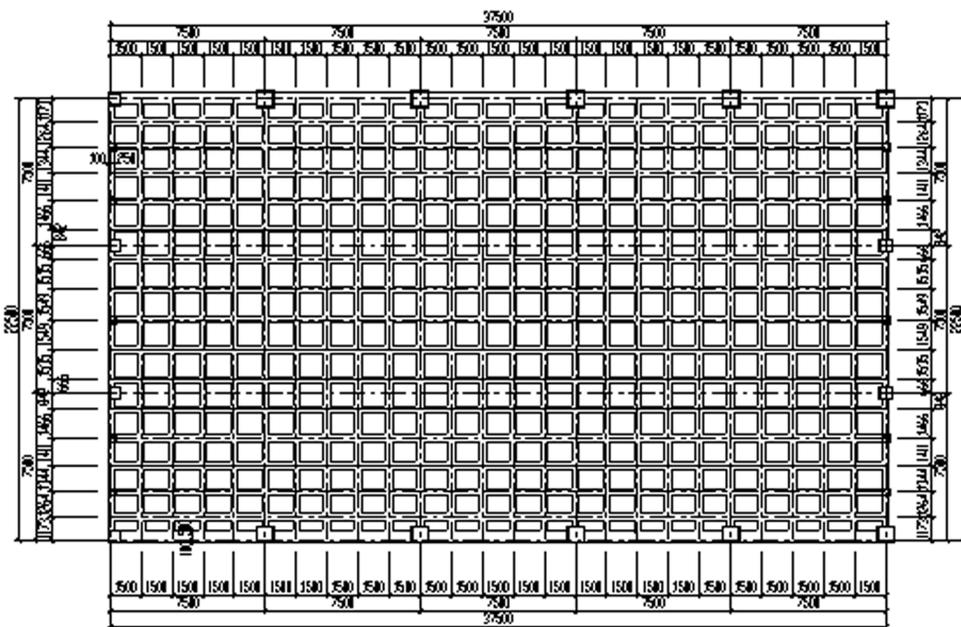


图 56 结构布置图

Fig. 56 Structure general arrangement

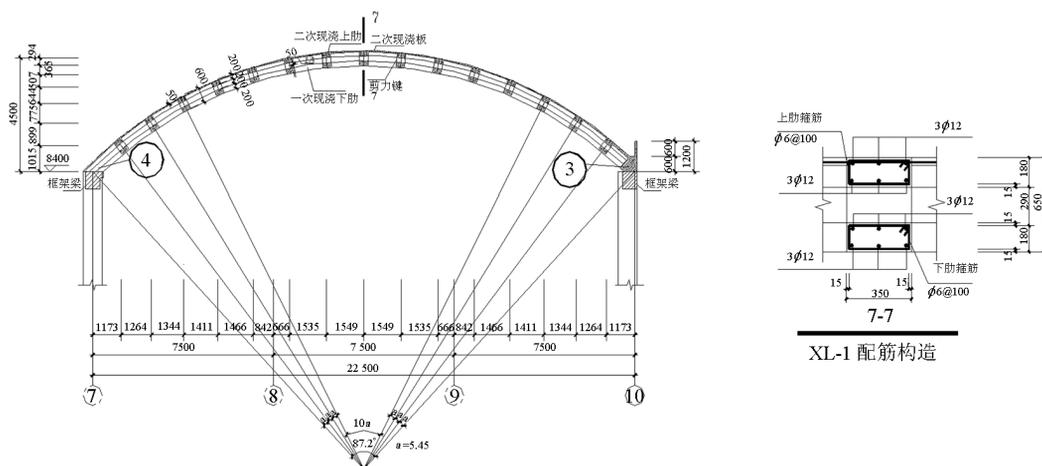


图 57 空腹夹层网壳与网拱结构截面图

Fig. 57 Section of open - web sandwich shell and arch structure

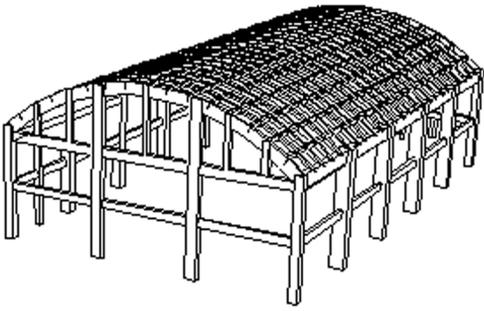


图 58 结构轴测图

Fig. 58 Axonometric chart of the structure



图 59 工程实录

Fig. 59 Record of the project



图 60 工程实录

Fig. 60 Record of the project

## 7 结语

### 7.1 钢筋混凝土新型空间网格结构应用前景

混凝土结构、钢结构和钢-混凝土组合结构,是目前国内外建筑行业主要的土建工程结构形式。这3种结构形式,根据自身的特点而应用于相应的建筑工程,谁好谁次,要客观对待。20世纪70年代,从国外引进的焊接球和螺栓球钢网架与网壳结构,它是随着屋面材料的改进,如彩钢复合板等应用而

迅速发展,它有工厂化、标准化,空间三维受力和施工进度快的优点,但它的管壁较薄,防锈、防火和耐腐蚀性能较差,常年维修费用相对较高。我国广大城镇的工业与公共建筑中,绝大多数跨度在18~36m之间,除了钢网格结构之外,新型钢筋混凝土空间网格结构也大有用武之地,本文讨论的5种新型钢筋混凝土空间网格结构中既有应用于跨度为18~36m的单层与多层公共与工业建筑的屋盖与楼盖,也有应用于大柱网(7.8~12m)多、高建筑的楼盖。这5种结构各有千秋,新型钢筋混凝土空间网格结构是在原有的钢筋混凝土密肋井字楼盖基础上的开拓创新,进一步降低“板系”结构自重,具有“安全、合理、先进、经济”等优良的技术指标,在经济社会高速发展的今天,仍有广泛的应用前景。

### 7.2 高强混凝土材料的应用,使新型混凝土空间网格结构更有“用武之地”

新型混凝土空间网格结构体系的研制前提是在确保结构三维空间受力的基础上达到结构自重进一步降低,从而达到节约材料降低工程造价的目的,本文应用的几种混凝土空间网格结构新体系,其混凝土等级均在C25~C35之间,在混凝土容重基本不变的前提下,如能将混凝土等级提高至C50~C80,这些高强混凝土的新型空间网格结构用材进一步下降,工程造价自然进一步减少,根据“科学发展观”分析事物,高强混凝土的发展必然促进这些新型混凝土空间网格结构的开拓与发展。

### 参考文献

- [1] 沈祖炎,马克俭,等.空间网架结构[M].贵阳:贵州人民出版社,1987
- [2] 王崇昌,马克俭,等.高层建筑钢筋混凝土剪力墙结构分析[M].贵阳:贵州人民出版社,1989
- [3] 董石麟,马克俭,等.组合网架结构与空腹网架结构[M].杭州:浙江大学出版社,1992
- [4] 马克俭,张华刚,等.新型建筑空间网格结构理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2006
- [5] 马克俭,张华刚,等.钢筋混凝土空腹夹层板楼盖技术规程(DB 22/48-2005)[M].贵阳:贵州省建设厅,2005
- [6] 马克俭,张华刚,等.现浇混凝土圆孔空心楼盖结构技术规程(DBJ 52-52-2007)[M].贵阳:贵州省建设厅,2007
- [7] 马克俭,张华刚.大跨度钢筋混凝土空腹夹层板柱结构研究与应用[J].建筑结构学报,2000(6)
- [8] 马克俭,郑涛,等.钢丝网水泥管现浇混凝土空心板柱结构实用分析方法[J].空间结构,2002(3)
- [9] 张华刚,马克俭,等.现浇混凝土空心板楼盖结构连续化分析[J].空间结构,2004(4)
- [10] 马克俭,刘朱.高层建筑中大跨度楼盖采用钢筋混凝土混

合型网架结构的设计特点[J]. 空间结构,1995(4)

[11] 马克俭,张华刚. 空间网格结构在贵州的开拓与发展[J]. 工业建筑(第三届全国现代结构工程学术研讨会论文集), 2003,7(增刊)

[12] 倪江波,马克俭. 现浇轻质填芯钢筋混凝土板柱结构试验研究[J]. 建筑结构学报,2003(2)

[13] MI Ke - Jian. Stud and Application of Steel - concrete Composite

Column Structures [J]. Proceedings of Sixth Pacific Structural Steel Conference . Beijing, China,2001,2(10)

[14] MI Ke - Jian. The study and Application of place Grids structures From Composite Materials[J]. The First in Transactional Conference on Lightweight Structures in Architecture. Sydney, Australia,1986,2

## Development of new systems of reinforced concrete spatial grid structure in China

Ma Kejian, Zhang Huagang, Xiao Jianchun, Lu Yaqin

(Space Structures Research Center of Guizhou University, Guiyang 550003, China)

[ **Abstract** ] Reinforced concrete spatial grid structure includes planar open-web grid structure, open-web sandwich plate structure, open-web dual grid structure, cast-in-place concrete round eye hollow plate structure, these new structure systems have been applied in the plate of public buildings amount to more than 1 million square meters from the 1980s until now, and obtained the excellent social and economic efficiency. The corresponding technical specifications for some have been established. In recent years, we have developed the reinforced concrete open-web sandwich shell and arch structure through bending the reinforced concrete open-web sandwich plate structure by one direction, and the reinforced concrete open-web sandwich hyperbolic flat shell structure through bending the reinforced concrete open-web sandwich plate structure by the two directions. These new spatial grid structure systems have the proprietary intellectual property rights of our country and have their own characteristic and the compatibility for the buildings. In the paper, we will introduce one by one successively according to the development time order. The security and rationality and efficiency and advancement of the structure will be analyzed through the project examples.

[ **keywords** ] reinforced concrete; open-web sandwich plate; cast-in-place concrete round eye hollow plate; grid structure; shell structure