

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.01.002

正六边形蜂窝型空间盒式结构受力性能对比分析

何嘉杰, 杨晓华, 何嘉沛, 彭斯宁

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了研究正六边形蜂窝型空间盒式楼盖结构体系在大跨度中高层建筑中的受力性能, 根据工程实例, 运用 ANSYS 有限元结构分析软件建立了不同平面楼盖结构布置的有限元分析模型, 对比研究了正六边形蜂窝型空间盒式结构体系与正交斜放型空间盒式结构体系在竖向静力试验作用下的结构反应, 研究了两种不同盒式结构楼盖的最大挠度、自振频率和整体刚度。研究表明, 在竖向荷载作用下, 正六边形蜂窝型空间盒式结构体系呈现三向传力特性, 结构性能表现较好。相比正交斜放型空间盒式结构体系, 正六边形蜂窝型空间盒式结构体系的楼盖跨中挠度较小, 其整体性、稳定性更佳。依据模态分析方法, 通过对比两种结构体系的自振频率与周期, 得到了正六边形蜂窝型空间盒式楼盖结构体系的整体抗侧移刚度与空腹夹层板楼盖抗弯刚度均大于正交斜放型空间盒式结构的结论。从经济性层面上比较, 得知在相同使用功能要求情况下, 正六边形蜂窝型空间盒式楼盖结构体系的用钢量要远小于正交斜放钢混结构盒式结构体系的用钢量, 更能节约建造成本。

关键词: 钢混组合结构; 正六边形蜂窝型空间盒式结构; 静力分析; 有限元分析

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)01-0008-08

引文格式: 何嘉杰, 杨晓华, 何嘉沛, 等. 正六边形蜂窝型空间盒式结构受力性能对比分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(1): 8-15.

Comparative Analysis of Mechanical Performance of Hexagonal Honeycomb Space Box Structure

HE Jiajie, YANG Xiaohua, HE Jiapei, PENG Sining

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Aimed at a study of the mechanical property of hexagonal honeycomb space box floor structure system in long-span medium and high-rise buildings, based on specific engineering examples, a finite element analysis model of different plane floor structure layouts has thus been established by using ANSYS finite element structure analysis software, with a comparative study on the structural response of hexagonal honeycomb space box structure system and orthogonal inclined space box structure system under the action of vertical static test, followed by a research on the maximum deflection, natural frequency and overall stiffness of two different box structure floors. The results show that under the vertical load, the hexagonal honeycomb space box structure system embodies three-dimensional force transmission characteristics with a good structural performance. Compared with the orthogonal inclined space

收稿日期: 2021-11-29

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ6081)

作者简介: 何嘉杰 (1998-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为建筑结构及结构计算方法,

E-mail: 1836788927@qq.com

通信作者: 杨晓华 (1975-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为建筑结构及结构

计算方法, E-mail: 464644503@qq.com

box structure system, the hexagonal honeycomb space box structure system is characterized with a smaller mid-span deflection, as well as an improved integrity and stability. According to the modal analysis method, based on the natural frequencies and periods of the two structural systems, it is concluded that the overall lateral stiffness and the flexural stiffness of the open web sandwich slab floor of the hexagonal honeycomb space box structure system are greater than that of the orthogonal inclined space box structure. From the perspective of economy, it is known that under the same functional requirements, the steel consumption of the regular hexagonal honeycomb space box floor structure system is much smaller than that of the orthogonal inclined steel-concrete box structure system, thus greatly saving the construction cost.

Keywords: steel concrete composite structure; regular hexagonal honeycomb space box structure; static analysis; finite element analysis

0 引言

空腹夹层板盒式结构是马克俭院士于1995年提出的一种新型空间结构,该结构是一种由上肋梁、下肋梁、连接上下肋梁的竖向构件剪力键和上表面混凝土现浇板组成的三维空间结构体系^[1-2]。该结构体系通过去掉实体结构梁中受力较小且对结构刚度提升不大的梁腹部分而形成空腹空间结构,在不影响结构承载力的情况下,可以大幅度减轻结构自重。与传统框架结构相比,这种新型空间结构具有跨度大、适应性强、楼板挠度小、整体刚度大等特点,并且空腹夹层板的楼板高度仅为跨度的1/30~1/25,能极大提高建筑空间层高,空腹部分能为各种消防线路提供预设空间。这种新型空间结构现已被广泛应用于大跨度结构和中高层建筑中,取得了较好的经济效益与社会效益。

正六边形蜂窝型空腹夹层空间盒式楼盖结构体系的研究与实践仍处于初期研究阶段,其在多高层大跨度结构中的应用研究相对较少,但也取得了一定的研究成果。潘正斌等^[3]通过改变高跨比、空腹夹层板构件截面尺寸、网格尺寸、周边密柱截面尺寸、边梁截面尺寸和层间梁截面尺寸,研究其对钢结构正六边形蜂窝型空间盒式结构空腹夹层板楼盖结构基频的影响,得知高跨比、网格尺寸、空腹夹层板构件截面尺寸对结构基频的影响较大,并确定了影响空腹夹层板承载力性能的主要因素。李莉等^[4]对某多层大跨度公共建筑的钢筋混凝土正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖结构进行了研究,发现该结构可以灵活地划分区域以满足公共建筑对空间的使用要求,通过研究楼板的剪切变形,证明了混凝土蜂窝型空腹夹层板结构是一种刚度大、自重小、用材少的高性价比的结构形式。于兰兰等^[5]通过在方管剪力键周围增设加

劲板的模型试验,得知设置加劲板能使整个剪力键受力具有更明显的弹塑性受力特点,可以有效缓解构件连接部位的应力集中,且加劲板的设置可以提高整体结构的抗侧移刚度。杨彦辉等^[6]基于ANSYS有限元结构建模,对大直径蜂窝型钢混组合空腹夹层板楼盖进行了静力性能分析,发现楼盖挠度远低于现行规范规定的限值,上肋梁内力受表层混凝土薄板的影响较大,轴力在靠近圆周边缘处较大,下肋梁轴力以受拉为主,剪力键以剪切变形为主。盛龙飞等^[7]通过改变剪力键高度研究了正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的承载能力,研究结果与分析表明,随着剪力键高度的增加,空腹夹层板楼盖厚度增加,其楼盖抗弯刚度随之提高;但当剪力键高度增加到一定程度后,继续增加剪力键高度对楼盖承载力的提升增益并不高。王泽曦等^[8]通过对比现浇钢筋混凝土正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空间盒式结构、正交斜放空腹夹层板楼盖空间盒式结构和框架结构的力学性能差异,得知现浇钢筋混凝土正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空间盒式结构的平面适应性较强,结构整体性能好,结构刚度分布均匀,经济效益更佳。

正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空间盒式结构,是一种适应多高层大跨度的新型结构,其结构的受力机理和抗震性能等研究还不够完善,特别是针对多层正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空间结构的研究并不多。因此,本文针对一个多层钢混组合结构的正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空间盒式结构的具体实例,研究其在竖向均布荷载作用下的受力特点和变形机理,对比研究楼盖不同结构布置的结构反映,从而找出钢混组合结构的正六边形蜂窝型空腹夹层板框架盒式结构体系的传力特点和普遍特性,分析正六边形蜂窝型空腹夹层板框架盒式结构体系的优势。

1 正六边形空间盒式结构的基本结构

正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖结构由多个正六边形蜂窝型网格空腹夹层梁和上表面现浇混凝土板构成,该正六边形蜂窝型网格可以根据建筑功能要求组成诸如建筑平面为四边形、圆形、多边形盒式楼盖。本文研究的钢混组合结构正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖由钢结构上肋梁、下肋梁、剪力键和上表层现浇钢筋混凝土板组成(如图1所示)。其上肋梁和下肋梁均为T型截面钢梁,具体施工时将H型钢在腹板处一分为二,分别作为楼盖结构的上下肋梁。上下肋之间是空腹,正六边形网格交叉处用钢制圆环剪力键将上下肋梁连接为整体,最后与上表面现浇混凝土板一起组成空间空腹盒式结构楼盖。在竖向荷载作用下,主要由混凝土板和上下肋共同承担弯矩,剪力主要由剪力键承担。

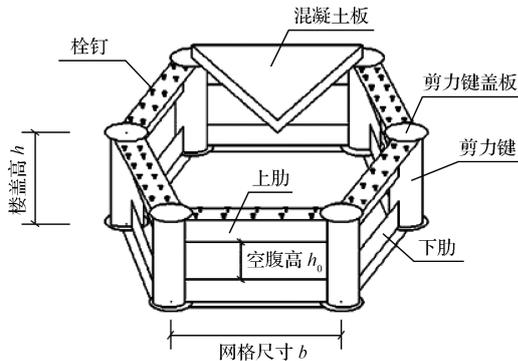


图1 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖结构简图
Fig. 1 Structural diagram of hexagonal honeycomb hollow sandwich floor

2 模型建立

2.1 工程概况

本文以拟建设的一栋5层钢混组合空腹夹层板楼盖空间盒式结构房屋为研究对象,该建筑为多层大跨度工业厂房,因使用要求,建筑内部需设置较大空间,只能在建筑四周布置钢筋混凝土框架柱。建筑底层层高为6.0 m,标准层层高为4.5 m;建筑平面短跨方向为20.8 m,长跨方向为46.0 m。由于建筑内部不允许布置竖向框架柱,楼盖跨度较大,需采用适合大跨度的楼盖结构体系。因此,需研究不同平面布置方式空腹夹层板楼盖的力学性能,特别是正六边形空腹夹层板楼盖组成的空间结构在竖向荷载作用下的承载性能。作为对比,对该建筑的楼盖和屋盖提出了两种空腹夹层板楼盖结构方案:一种采用钢混组合正六边形蜂窝型空腹夹层板空间盒式结构楼盖,另一种采用钢混组合正交斜放空腹夹层板空间盒式结构。比较这两

种空腹夹层板空间盒式结构在竖向荷载作用下的传力特性和正六边形蜂窝型空腹夹层板空间盒式结构楼盖的结构优势,为满足模数要求,两种结构平面尺寸略有差别。钢混组合正六边形蜂窝型空腹夹层板空间盒式结构平面布置如图2所示,图中尺寸单位为mm。

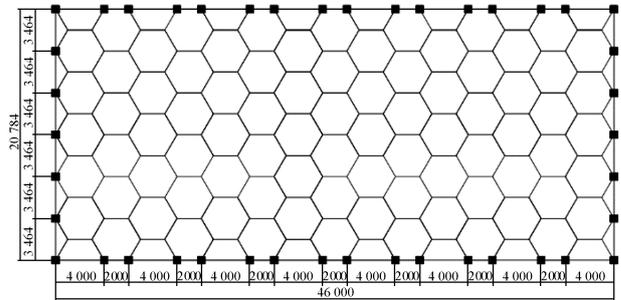


图2 正六边形蜂窝型空腹夹层板空间盒式结构平面布置图

Fig. 2 Plane layout of regular hexagon honeycomb hollow web sandwich panel space box structure

如图2所示,钢混组合正六边形蜂窝型空腹夹层板空间盒式楼盖结构建筑平面由多个边长为2.0 m的正六边形空间网格组成,建筑平面短跨方向尺寸约为20.8 m,长跨方向尺寸为46.0 m。现浇钢筋混凝土框架柱沿建筑四周布置,建筑短跨方向、正六边形网格楼盖与边梁组成等腰三角形,框架柱布置在边梁节点上,柱间间距为3.464 m;长跨方向,一部分正六边形网格楼盖一边即为边梁,另一部分与边梁组成梯形结构,框架柱布置在边梁节点上,柱间间距分别为4.0 m和2.0 m。

钢混组合正交斜放空腹夹层板空间盒式结构平面布置如图3所示。

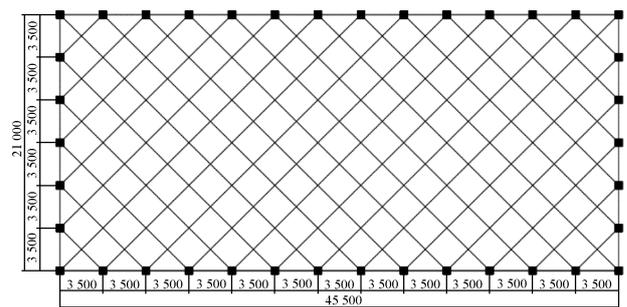


图3 正交斜放空腹夹层板空间盒式结构平面布置图

Fig. 3 Plane layout of orthogonal diagonal open web sandwich plate space box structure

如图3所示,钢混组合正交斜放空腹夹层板空间盒式结构建筑平面由多个正交斜放、边长约为2.5 m的正方形空间网格组成,建筑平面短跨方向尺寸为21.0 m,长跨方向尺寸为45.5 m。现浇钢筋混凝土框架柱沿建筑四周布置,建筑短跨和长跨方向正交斜

放网格梁与边梁组成 45° 角的等腰直角三角形, 框架柱布置在边梁节点上, 柱间间距为 3.5 m 。该建筑结构安全设计等级为二级, 为精确比较两结构特性, 结构分析模型各层楼面及屋面输入的外荷载完全相同。按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[9]中的相关要求, 建筑楼面恒荷载标准值取 4.4 kN/m^2 , 活荷载标准值为 5.0 kN/m^2 ; 不上人屋面恒荷载标准值为 4.4 kN/m^2 , 活荷载标准值为 0.5 kN/m^2 。有限元结构分析模型各层楼面输入均布荷载设计值为 13.2 kN/m^2 , 不上人屋面均布荷载设计值为 6.5 kN/m^2 。

2.2 设计参数

在结构选型过程中, 为较精确地对比分析两种不同平面布置的空腹夹层板楼盖对结构整体性能的影响, 两种平面布置的空腹夹层板楼盖厚度均为 1.0 m , 且各种组成构件类型与材料强度一样, 如表1、2所示。

表1 空间盒式结构构件截面尺寸
Table 1 Sectional dimensions of space box structural members mm

构件类型	六边形蜂窝型	正交斜放型
上下肋	T300×250×18×12	T300×250×18×12
剪力键	Φ340×12	Φ340×12
混凝土板	120	120
混凝土柱	600×600	600×600

表2 空间盒式结构各构件材料参数
Table 2 Material parameters of each component of the space box structure

构件	强度等级	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa
上下肋钢梁	Q345	0.3	7 850	206.0
钢剪力键	Q345	0.3	7 850	206.0
混凝土柱	C35	0.2	2 500	31.5
混凝土楼板	C35	0.2	2 500	31.5

2.3 有限元结构模型

运用 ANSYS 有限元结构分析软件建立空间结构分析模型, 采用 2D 实体 BEAM188 单元模拟上、下肋钢梁^[10]、钢结构剪力键和建筑四周现浇混凝土框架柱; 采用 SHELL181 板单元模拟楼盖上表层混凝土板。钢结构空腹夹层梁与建筑四周现浇混凝土柱的连接方式为共节点刚接, 建筑结构框架柱底为嵌固约束, 在有限元分析模型中, 框架柱底面所有节点施加沿 3 个坐标轴位移为 0 m 和转角为 0° 的边界条件。

正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空间盒式结构的四周现浇混凝土框架柱, 沿长边方向间距按六边形网格与边梁交点不等跨循环布置, 框架柱间距分别为 4.0 m 和 2.0 m ; 短边方向等间距布置, 框架柱间距为 3.464 m 。在有限元分析模型中, 框架柱每层划分为一个单元; 空腹夹层板楼盖六边形网格每边钢结构

上肋梁、下肋梁划分为一个单元; 六边形网格交点处连接上下肋梁的竖向构件剪力键划分为一个单元; 上表面现浇混凝土楼板以形心为交点, 沿六边形网格边划分为 6 个正三角形板单元。有限元结构分析模型中框架柱共划分为 420 个混凝土杆单元, 上、下肋梁共划分为 3 660 个钢结构杆单元, 剪力键共划分为 480 个钢结构杆单元, 上表面楼板共划分为 3 100 个混凝土板单元, 总单元数为 7 660 个。正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖结构的有限元分析模型如图 4 所示。

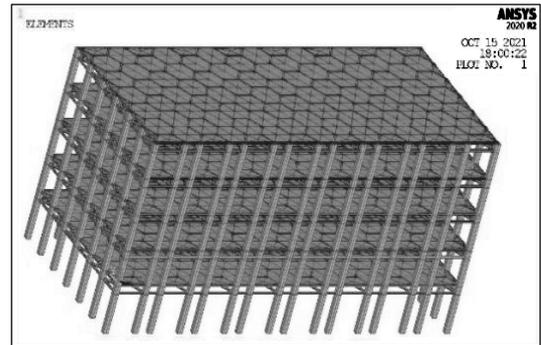


图4 正六边形蜂窝型空间结构的有限元分析模型
Fig. 4 Finite element model of the regular hexagonal honeycomb space structure

在正交斜放空腹夹层板楼盖空间盒式结构的四周现浇混凝土框架柱, 且沿长边和短边方向等间距布置, 框架柱间距均为 3.5 m 。在有限元分析模型中, 框架柱每层划分为 1 个单元; 空腹夹层板楼盖正方形网格每边钢结构上肋梁划分为 2 个单元, 下肋梁划分为 1 个单元; 网格交点处剪力键划分为 1 个单元; 上表面现浇混凝土楼板在每个网格内划分为 4 个正方形板单元。有限元结构分析模型中, 框架柱共划分为 380 个混凝土杆单元, 上、下肋梁共划分为 5 550 个钢结构杆单元, 剪力键共划分为 390 个钢结构杆单元, 上表面楼板共划分为 3 310 个混凝土板单元, 故其总单元数为 9 630 个。正交斜放空腹夹层板楼盖结构的有限元分析模型如图 5 所示。

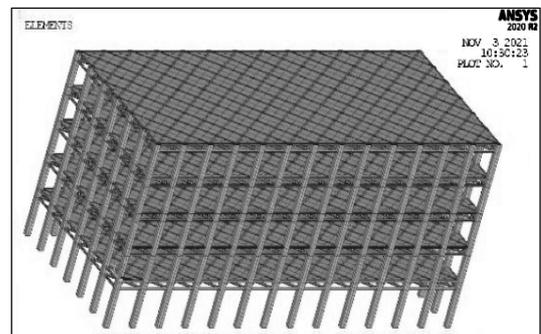


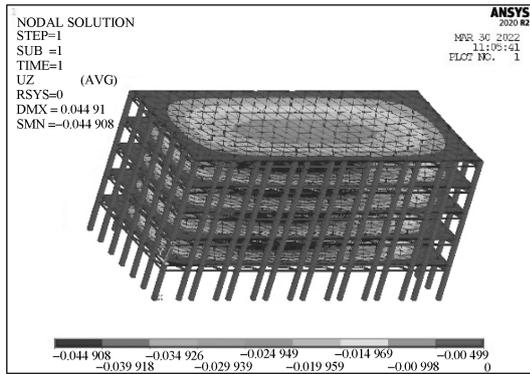
图5 正交斜放型空间结构的有限元分析模型
Fig. 5 Finite element analysis model of the orthogonal oblique space structure

框架柱下部与基础嵌固连接，在有限元结构模型框架柱底面，所有节点施加沿3个坐标轴方向位移为0 m和扭转角度为0°的边界条件。

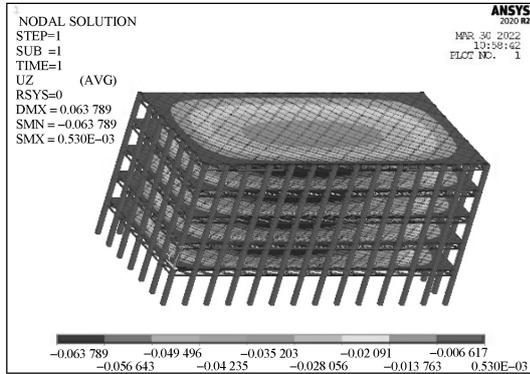
3 结果对比与分析

3.1 楼盖竖向位移

对两种不同楼盖布置的有限元结构分析模型各层楼盖板和屋盖板施加大小相等的竖向均布面荷载，对结构进行线弹性分析。竖向荷载作用下两种空间盒式结构各层楼盖计算得到的竖向位移云图如图6所示。



a) 正六边形蜂窝型空间结构



b) 正交斜放型空间结构

图6 竖向荷载作用下两种结构各层楼盖竖向位移云图

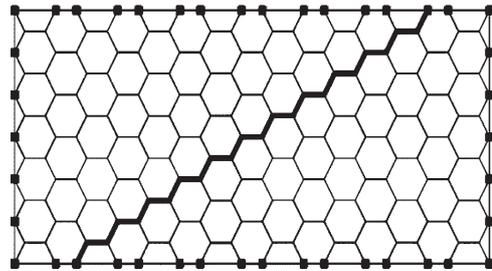
Fig. 6 Nephogram of vertical displacement of each floor of two structures under a vertical load

由图6可以看出，两种不同楼盖布置结构各层楼盖板和屋盖板竖向位移模式比较相近，各层楼盖均向下变形呈“凹”形，每层楼盖的最大位移都发生在跨中区域，越靠近四周边梁的挠度越小。两个结构模型计算得到的最大位移均发生在底层楼盖跨中位置处，其中，正六边形蜂窝型空间盒式结构的最大竖向位移为44.90 mm，约为跨度的1/463；正交斜放型空间盒式结构的最大竖向位移为63.79 mm，约为跨度的1/329，可见正交斜放型空腹夹层板楼盖的最大竖向位移大于正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的，而正六

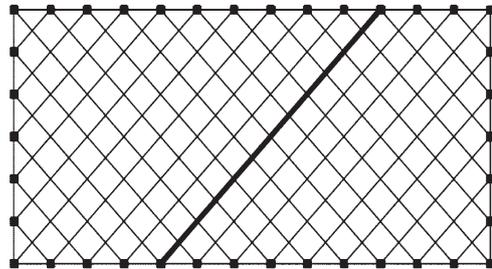
边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的最大挠度仅为正交斜放型空腹夹层板楼盖的70%。很显然，在楼盖跨度、高度和梁、板结构尺寸相同的情况下，正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的抗弯刚度更大，受力性能更优，结构布置更加合理。由此可知，正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖蜂窝型网格在大跨度、大开间、多高层建筑中的挠度控制方面更有优势。

3.2 内力分析

空腹夹层梁由上、下肋梁和剪力键组成，其受力和变形与实腹梁不同，空腹梁的上、下肋梁和剪力键在楼面竖向荷载作用下除会随楼盖整体变形外，其自身也会产生局部变形，上肋梁的局部变形又受上层现浇混凝土楼板刚度的影响。针对两种不同的结构平面布置，按如图7所示位置分别选取一根横跨短轴方向的连续空腹夹层钢梁，分析研究其上、下肋梁的受力情况，具体分析结果如图8所示。



a) 正六边形蜂窝型空间结构



b) 正交斜放型空间结构

图7 选取钢梁示意图

Fig. 7 Schematic diagram of selected steel beams

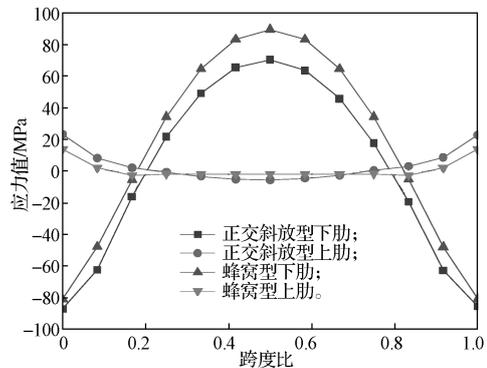


图8 连续空腹梁的轴力数值分析结果

Fig. 8 Numerical analysis results of the axial force of continuous hollow beams

由图8可以得出, 两种不同平面布置方式组成的空腹夹层梁上、下肋梁横截面的正应力沿短跨方向的变化曲线相近, 反弯点约在楼盖短跨方向的1/4处。上肋梁在建筑周边附近主要受力为拉应力和剪应力, 跨中附近为压应力; 而下肋梁与之相反, 在建筑周边附近为拉应力和剪应力, 跨中附近为拉应力。相比之下, 下肋梁横截面所受正应力数值远大于上肋梁的, 说明空腹夹层板楼盖上表面现浇混凝土楼板对上肋梁的影响较大。正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖下肋梁在跨中区域的拉应力一直大于正交斜放型空腹夹层板楼盖的, 而在两端建筑周边附近, 前者的压应力又小于后者的。在跨中附近, 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖下肋梁的最大拉应力为87 MPa, 正交斜放型空腹夹层板楼盖下肋梁的最大拉应力为73 MPa, 两者约相差19%; 在边柱交点处, 前者的压应力为80.8 MPa, 后者的压应力为85.6 MPa, 两者约相差6%。

空腹夹层板上肋梁由于连接上表层现浇混凝土板, 因而其横截面的正应力需远小于下肋梁横截面的正应力; 在两端受拉区的应力由端部向内逐渐减小, 过反弯点进入受压区后, 压应力数值较小, 并且变化也较小, 几乎接近为一个常数。相比之下, 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖上肋梁在跨中区域的压应力一直小于正交斜放型空腹夹层板楼盖的, 而在两端拉应力区域, 前者的拉应力一直小于后者的拉应力。对比应力数值, 在跨中压应力区域, 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖上肋梁的最大压应力为7.21 MPa, 而正交斜放型空腹夹层板楼盖上肋梁的最大压应力为11.59 MPa, 两者约相差37%; 在边柱交点处, 前者的拉应力为13.8 MPa, 后者的拉应力为22.8 MPa, 两者约相差40%。

从上面的数据对比分析可以得知, 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖在构造方面比正交斜放型空腹夹层板楼盖复杂, 但更适用于多高层大跨度结构, 在相同竖向荷载作用下, 楼盖挠度小, 受力比较均匀, 上、下肋梁所承受的拉压应力也小于正交斜放型空腹夹层板楼盖的, 更能充分利用钢混组合结构中钢构件的抗拉性能和混凝土构件的抗压性能。正六边形网格具有三向特征, 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖在竖向荷载作用下应具备三向传力特点, 可以较短的距离将竖向荷载传递到建筑周围的竖向构件上。空腹夹层板楼盖上表面现浇混凝土楼板支承在下面钢结构空腹梁上, 其跨度较小, 且其在楼板水平平面内的刚度较大, 协助上肋梁承担了大部分轴向荷载和竖向剪力。

4 结构模态分析

结构的自振周期是结构本身固有的动力特性, 只与自身质量和刚度有关, 每一个模态都有特定的固有频率和模态振型, 结构越柔, 自振周期越长。表3给出了两种不同平面布置的空间盒式结构前10阶自振频率和自振周期对比结果。

表3 两种结构模型前10阶的自振频率和周期对比结果
Table 3 Comparison results of natural frequencies and periods of the first 10 orders of the two structural models

阶数	正六边形蜂窝型网格		正交斜放型网格		备注
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	
1	1.622 1	0.62	1.296 5	0.77	y向平动
2	1.900 9	0.53	1.416 6	0.71	x向平动
3	2.237 3	0.45	1.565 1	0.64	扭转
4	4.747 0	0.21	4.020 1	0.25	
5	4.992 8	0.20	4.140 3	0.24	
6	5.102 9	0.19	4.240 6	0.24	
7	5.202 4	0.19	4.250 8	0.24	
8	5.300 8	0.19	4.281 3	0.23	
9	5.362 0	0.19	4.320 4	0.23	
10	5.906 8	0.17	4.600 9	0.22	

由表3可以得知, 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖组成空间盒式结构的前10阶自振频率, 均大于正交斜放型空腹夹层板楼盖组成的空间盒式结构, 且前者对应的自振周期均小于后者。正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖组成的空间盒式结构, 沿长边方向框架密柱依据六边形网格特性不等距循环布置, 布置框架柱个数多于等距布置的正交斜放空腹夹层板楼盖组成的空间盒式结构, 导致前者抗侧刚度大于后者。对比前三阶主自振动周期可以得出, 前者整体结构沿短、长轴方向水平振动和整体结构扭转振动的自振周期均小于后者。两种空间盒式结构的第一扭转周期与第一平动周期的比值分别为0.725 0和0.828 4, 均满足《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[11]中小于0.9的要求。这说明空腹夹层板楼盖仅在周边布置框架密柱的方法, 其抗侧力构件满足现行国家规范要求, 但正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖组成的空间盒式结构的结构特性更好。

为进一步比较正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖和正交斜放空腹夹层板楼盖的整体抗弯刚度, 分别选取两种结构布置的主振型为顶层楼盖和第二层楼盖沿竖向z轴方向自由振动的自振频率 f , 通过下式可以得到空腹夹层板楼盖的整体抗弯刚度 k :

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

两种空腹夹层板楼盖上表面混凝土楼板厚度相

同,质量相当,但其楼板下的钢结构构件布置方式不同,因而两者质量也不同。通过计算得到,六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的总质量约为 97 000 kg,正交斜放型空腹夹层板楼盖的总质量约为 123 000 kg。依据有限元结构分析得到结构的自振频率,进而可以得到两者间的刚度比

$$\frac{k_6}{k_4} = \frac{m_6 f_6^2}{m_4 f_4^2} \approx \frac{6}{5} = 1.2。$$

式中: k_6 为正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖刚度;

k_4 为正交斜放型空腹夹层板楼盖刚度。

计算结果表明,正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖在自身质量较小的情况下,其整体抗弯刚度却优于正交斜放型空腹夹层板楼盖的。对比这两种楼盖的质量,可以得知正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的质量约为正交斜放型空腹夹层板楼盖质量的 0.92,其整体抗弯刚度却高出 20%,这说明正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖结构布置更加合理高效,能大大提升空腹夹层板楼盖的刚度,在多高层大跨度大空间结构中更具优势。

5 经济性比较

两种空腹夹层板楼盖空间整体结构每层楼盖和屋盖上表面现浇混凝土楼板厚度均为 120 mm,配筋为双层双向配筋,钢筋直径和间距相等,混凝土用量和钢筋用量相同^[12]。故两种空腹夹层板楼盖的经济性主要体现在各楼层空腹夹层梁的钢材用量上。表 4 为根据两种平面布置情况分别计算出的空腹夹层梁上、下肋长度和剪力键长度,然后按材料自身质量得到每层空腹夹层梁的钢材用量。

表 4 每层空腹夹层板楼盖的钢材用量

Table 4 Steel consumption of each layer of open-web sandwich slab floor t

构件类型	正六边形蜂窝型网格	正交斜放型网格
上下肋	87.8	115.8
剪力键	9.2	7.6
合计	97.0	123.4

由表 4 可以得出,在建筑平面尺寸相近的情况下,空腹夹层梁高度和截面尺寸根据楼盖跨度确定。本次对比研究的多层大跨度厂房结构跨度相同,选用的空腹夹层梁高度和截面尺寸相同,其区别在于楼盖平面布置不同。通过计算,正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖每层空腹梁的钢材用量为 97.0 t,而正交斜放型空腹夹层板楼盖每层空腹梁的钢材用量为 123.4 t,这表明正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空腹梁用

钢量仅为正交斜放空腹夹层板楼盖的 7/9,节约钢筋约 22%。综合考虑,在建筑平面尺寸相近的情况下,正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的整体抗弯刚度高于正交斜放型空腹夹层板楼盖对应值,可见其经济性也明显好于正交斜放型空腹夹层板楼盖的。

6 结论

1) 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖在竖向荷载作用下具备三向传力特征,在几何尺寸相同的情况下,正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖组成的空间结构受力均匀,整体结构的抗侧移能力和楼盖抗弯刚度均大于正交斜放型空腹夹层板楼盖组成的空间结构。

2) 空腹夹层板楼盖上表面现浇混凝土楼板对下面上肋梁影响较大,区格板的跨度较小,相比钢结构上肋梁,其在楼板水平平面内的刚度较大,协助上肋梁承担了大部分轴向力和竖向剪力,导致上肋梁横截面正应力远小于下肋梁的。

3) 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖组成的钢混组合空间盒式结构更适用于多高层大跨度结构,在相同的竖向荷载作用下,楼盖挠度较小,受力较为均匀,上、下肋梁所承受的拉压应力小于正交斜放型空腹夹层板楼盖,更能充分利用钢混组合结构中钢构件的抗拉性能和混凝土构件的抗压性能。且其经济性优于正交斜放空腹夹层板楼盖组成的空间盒式结构。

参考文献:

- [1] 张华刚,张钰,吴琴,等.新型混凝土壳体结构的研究概况及工程实践[J].空间结构,2019,25(3): 3-12, 21.
ZHANG Huagang, ZHANG Yu, WU Qin, et al. Research Status and Engineering Application of New Type Concrete Shell Structures[J]. Spatial Structures, 2019, 25(3): 3-12, 21.
- [2] 晁亚茹,马克俭,申波,等.蜂窝型钢空腹夹层板的基频回归分析[J].空间结构,2018,24(4): 62-67.
CHAO Yaru, MA Kejian, SHEN Bo, et al. Regression Analysis on Fundamental Frequency of Honeycomb-Type Steel Open-Web Sandwich Plates[J]. Spatial Structures, 2018, 24(4): 62-67.
- [3] 潘正斌,马克俭,李莉,等.装配式盒式结构中正六边形蜂窝型钢空腹夹层板楼盖动力特性分析[J].施工技术,2020,49(3): 87-91.
PAN Zhengbin, MA Kejian, LI Li, et al. Analysis of Dynamic Characteristics of Hexagonal Honeycomb Steel Hollow Web Sandwich Floor in Fabricated Box Structure[J]. Construction Technology, 2020, 49(3):

- 87-91.
- [4] 李莉, 马克俭, 陈志鹏. 正六边形多层大跨度公共建筑的混凝土蜂窝型空腹夹层板楼盖结构研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(11): 51-56.
LI Li, MA Kejian, CHEN Zhipeng. Research on Concrete Honeycomb Open-Web Sandwich Plate Structure in Hexagonal Multistory Long-Span Public Buildings[J]. Building Structure, 2018, 48(11): 51-56.
- [5] 于兰兰, 白志强, 魏艳辉, 等. 加劲板对方管剪力键静力性能的影响[J]. 工业建筑, 2020, 50(5): 139-144, 120.
YU Lanlan, BAI Zhiqiang, WEI Yanhui, et al. Influence of Stiffening Plate on the Static Mechanical Behavior of Square Tube shear-Resistant Connector[J]. Industrial Construction, 2020, 50(5): 139-144, 120.
- [6] 杨彦辉, 马克俭, 卢亚琴, 等. 大直径蜂窝型钢混组合空腹夹层板楼盖静力性能分析[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(3): 150-152.
YANG Yanhui, MA Kejian, LU Yaqin, et al. Static Performance Analysis of Large Diameter Honeycomb Steel-Concrete Composite Vierendeel Sandwich Slab Floor[J]. China Water Transportation (the Second Half of the Month), 2021, 21(3): 150-152.
- [7] 盛龙飞, 杨晓华, 何嘉沛, 等. 剪力键高度对蜂窝空腹楼盖承载力的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(3): 19-24.
SHENG Longfei, YANG Xiaohua, HE Jiawei, et al. Influence of Shear Key Height on the Bearing Capacity of Honeycomb Hollow Floor[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(3): 19-24.
- [8] 王泽曦, 马克俭, 晁亚茹, 等. 钢筋混凝土网格蜂窝型盒式结构力学性能对比分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, 33(2): 97-101.
WANG Zexi, MA Kejian, CHAO Yaru, et al. Mechanical Comparison Analysis of New RC Grid Honeycomb Cassette Structure[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2016, 33(2): 97-101.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load Code for the Design of Building Structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Steel Structure Design Standard: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [12] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 390-395.
WANG Xinmin. Numerical Analysis of ANSYS Engineering Structure[M]. Beijing: People's Communications Press, 2007: 390-395.

(责任编辑: 廖友媛)