

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.01.001

网格尺寸效应对蜂窝空腹楼盖静力性能的影响

彭斯宁, 杨晓华, 何嘉杰, 张泽良, 刘宇杰

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 使用 ANSYS 有限元结构分析软件, 针对正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖进行分析。分析影响正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖中划分网格的尺寸效应, 对比分析了此种结构与正交正放网格空腹夹层楼盖的网格尺寸与楼盖承载能力之间的效应关系。结果表明, 正六边形蜂窝型空腹夹层板的网格尺寸效应比较明显, 在合适的网格尺寸下, 其钢-混凝土共同作用更加充分, 经济效益更加优秀。此外, 分析了混凝土表层板厚度对此种结构网格尺寸效应的影响, 结果表明, 增加混凝土表层板厚度, 对于楼盖的承载力有正向增益, 同时对结构的网格尺寸效应影响较大。

关键词: 有限元分析; 蜂窝型空腹夹层板楼盖; 网格尺寸; 尺寸效应

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2024)01-0001-07

引文格式: 彭斯宁, 杨晓华, 何嘉杰, 等. 网格尺寸效应对蜂窝空腹楼盖静力性能的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(1): 1-7.

Research on the Grid Size Effect on the Static Performance of Honeycomb Hollow Floors

PENG Sining, YANG Xiaohua, HE Jiajie, ZHANG Zeliang, LIU Yujie

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

Abstract: An analysis has been made of the hexagonal honeycomb fasting sandwich sheet covers by using ANSYS finite element structural analysis software. On the basis of the size effect of grid division in the hexagonal honeycomb hollow sandwich panel floor, a comparative study has been carried out on the effect relationship between the grid size of the fasting sandwich covers and the bearing capacity of the building covers, with the results showing that there is an obvious grid size effect of the regular hexagonal honeycomb fasting sandwich plate, and the steel concrete interaction is more sufficient with more excellent economic benefits. A further analysis has been made of the influence of concrete surface slab thickness on the grid size effect of this structure, with the results showing that an increase of the thickness of concrete surface slab has a positive gain on the bearing capacity of the building cover with a great influence on the grid size effect of the structure.

Keywords: finite element analysis; honeycomb hollow sandwich floor; grid width; size effect

0 引言

空间结构^[1]是形态呈三维立体状态, 在载荷作

用下具有三维传力特性^[2], 即表现为三维空间工作^[3]的形态。空腹夹层板^[4]是马克俭教授团队自主提出并创新研制成功的一种新型空间结构, 这种结构具

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ6081)

作者简介: 彭斯宁, 男, 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: 71488513@qq.com

通信作者: 杨晓华, 男, 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

有良好的受力性能,并被广泛运用于实际工程^[5]中,理论分析也得到了充分验证。正六边形蜂窝型空腹夹层板^[6]是马克俭教授提出的新型结构类型,它是由肋梁围成正六边形的蜂窝状造型单元,该结构不仅安全度较高,变形较小,而且造型独特,结构美观。李莉等^[7]通过对比各结构类型楼盖研究得出,不同结构类型楼盖板跨中挠度基本相同,但内力传递方式不同,正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖空腹率较高,蜂窝型空腹夹层板楼盖结构自重和钢筋用量都是最小的。才琪等^[8]采用子空间迭代法计算六边形蜂窝型钢筋砼空腹夹层板楼盖的基频和各阶振型,发现高跨比、空腹率和密柱截面边长对空腹夹层板楼盖基频的影响程度都大于5%,属于主要因素。徐金涛等^[9]对上、下肋对蜂窝形钢筋混凝土空腹夹层板挠度的影响进行了分析,研究结果表明上、下肋刚度越大,蜂窝形钢筋混凝土空腹夹层板的挠度就越小。晁亚茹等^[10]通过对蜂窝型钢网格楼盖进行了参数化动力分析,分析了剪力键宽度、钢空腹桁架高度、表层楼盖板和上、下弦梁对结构自振特性的影响。

通过上述分析可知,现有的正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖结构研究较为完善^[11],但是关于混凝土结构部分^[12-13]和钢结构部分^[14-15]对于空腹夹层板楼盖的整体刚度影响尚未进行深入研究;另外,网格尺寸对蜂窝型空腹夹层板楼盖受力性能影响方面的研究并不深入。因此,本文拟采用有限元分析方法,通过对比分析,研究不同网格尺寸对楼盖承载力的影响,并分析混凝土结构以及钢结构对于楼盖整体刚度的影响,以期为该结构的工程实际应用提供参考依据。

1 基本模型

1.1 工程概况

正六边形蜂窝型空腹楼盖通常使用的剪力键形式有Y字形、三角形和圆环形等形状,其中三角形与圆环形剪力键构造如图1所示。

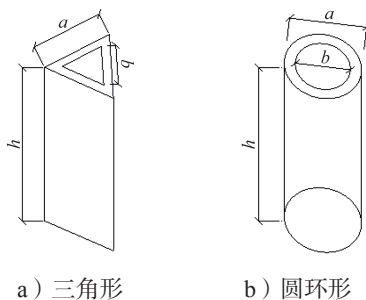


图1 三角形与圆环形剪力键构造图

Fig. 1 Diagram of triangular shear bond and torus shear bond construction

而Y字形剪力键相较于其他形式的剪力键,其与空腹梁上、下翼缘接触面较大,三向抗弯刚度较大,更符合正六边形蜂窝楼盖三向传力的特点,能有效改善剪力键与肋梁连接处的应力分布,减少应力集中,提升空腹夹层板楼盖的整体刚度。

正六边形钢-混凝土空腹夹层板楼盖分为上下两部分,其中上部为混凝土板,下部由上、下肋钢结构梁组成,上、下肋均为T型截面;剪力键为Y字形截面钢,截面尺寸厚度与上、下肋T型截面腹板厚度一致。上、下肋钢结构由剪力键连接,Y字形剪力键构造如图2所示。

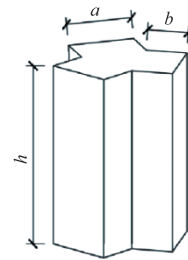


图2 Y字形剪力键构造示意图

Fig. 2 Y-shaped shear key construction diagram

空腹夹层板楼盖结构剖面图如图3所示。

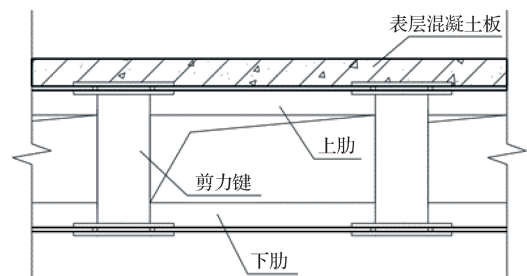


图3 空腹夹层板楼盖结构剖面图

Fig. 3 Structural profile of hollow sandwich floor

在有限元分析中,为了体现混凝土表层板以及钢结构对于楼盖整体刚度的贡献,对混凝土表层板采用SOLID65单元,上、下肋梁及剪力键均采用SOLID185单元,具体的构件参数及截面尺寸见表1。

表1 各构件参数及单元选用

Table 1 Parameters and unit selection of each component

构件	截面尺寸/mm	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	ANSYS单元
剪力键	112×45	0.3	7 850	206	SOLID185
上肋	T250×432×45×70	0.3	7 850	206	SOLID185
下肋	T250×432×45×70	0.3	7 850	206	SOLID185
表层板	100	0.2	2 500	30	SOLID65

注:表中剪力键尺寸为长 a ×厚度 b ,上、下肋截面尺寸为T型钢截面尺寸宽×高×腹板厚度×翼缘宽度。

为了有效研究正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的网格尺寸效应,使其在受到竖向均布荷载作用时,

分析不同网格尺寸对应挠度曲线状态以及受力性能, 本研究中建立了跨度在 30 m 左右的矩形楼盖, 楼盖网格采用边长为 1.0~4.5 m 的正六边形, 使在仅受网格尺寸长度与跨度之比改变而其余条件均一致的情况下, 建立了 8 组正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖对照模型, 以进行对照分析。其平面布置跨度尺寸见表 2。为进一步深入研究网格尺寸大小对楼盖承载力的影响, 每组楼盖网格分别建立一组网格尺寸相同的对照组 - 正交正放正方形钢 - 混凝土空腹楼盖的对比模型。

表 2 平面布置跨度尺寸表
Table 2 Plane layout span dimension table

模型组号	平面边长 /m	长跨 /m	短跨 /m	网格边长与跨度比 (长跨比)
1	1.0	31	29	0.033
2	1.5	31	31	0.048
3	2.0	31	28	0.068
4	2.5	31	28	0.085
5	3.0	33	31	0.094
6	3.5	30	28	0.121
7	4.0	34	28	0.129
8	4.5	31	31	0.145

以六边形网格边长为 3.5 m, 即长跨比为 0.121 的模型为例, 构建如图 4 所示的平面布置图 (图中尺寸单位为 mm), 其长跨为 30.31 m, 短跨为 28.00 m, 网格边长为 3.5 m, 材料参数以及截面尺寸详见表 1, 图 4 为对照正交正放网格模型的平面布置图。对每组特定的模型, 仅改变其长跨比, 通过观察楼盖的整体位移, 研究其静力变化以及网格尺寸效应。

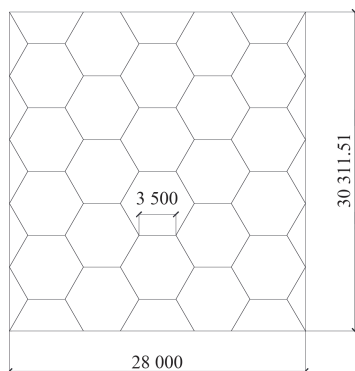


图 4 第 6 组模型平面布置图

Fig. 4 Layout plan for group 6 model

1.2 对照模型

空腹夹层板楼盖的结构形式与大部分楼盖的结构形式有明显区别, 为了进一步研究尺寸效应如何影响正六边形蜂窝型空腹夹层板结构的整体刚度, 以及正六边形蜂窝型网格形式的尺寸效应与其他不同网

格形式尺寸效应的差别, 对照正六边形蜂窝型网格, 建立了一个正交正放网格结构模型进行对比分析。通过对不同网格形式的尺寸效应进行对比, 以对空腹夹层板结构的网格尺寸效应有更深层次的理解。对每组特定的模型, 仅改变长跨比, 通过观察楼盖的整体位移, 研究其静力变化以及网格尺寸效应。如图 5 为对应正六边形网格第 6 组结构模型网格尺寸大小而建立的对照正交正放网格结构模型的平面布置图。

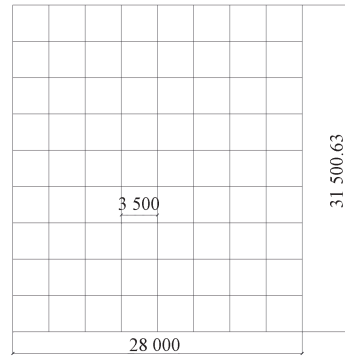


图 5 第 6 组对比模型平面布置图

Fig. 5 Comparison model layout plan for group 6

2 有限元分析

2.1 模型建立

根据分析要求建立有限元结构分析模型, 结构模型的构件参数和单元的选用如表 1 所示。

对于有限元结构分析, 钢结构上肋 T 形截面钢梁、下肋 T 形截面钢梁和 Y 字形剪力键采用 SOLID185 六面体实体单元进行网格划分, 正六边形蜂窝型网格上、下肋钢梁划分为 4 个单元, 与上、下肋钢梁连接的剪力键高度为 800 mm, 划分为 5 个单元。剪力键和上、下肋梁的连接网格划分如图 6 所示。整个空腹夹层板结构上、下肋梁均划分为 348 个单元, 剪力键划分为 66 个单元, 正六边形蜂窝型空腹夹层板的钢结构部分总共划分为 678 个有限单元。有限元分析模型中钢结构部分网格划分情况如图 6 所示

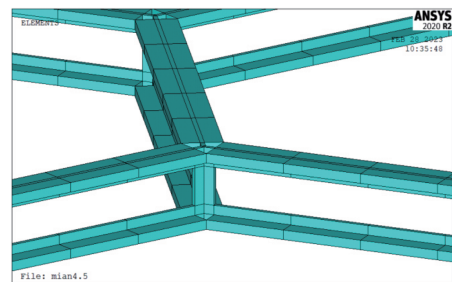


图 6 钢结构空腹夹层梁的网格划分图

Fig. 6 Steel structure fastening sandwich beam meshing

混凝土表层板的网格划分采用 SOLID65 实体单元, 六边形网格区域以板中点为节点向六边形角点连

线将其均匀划分成4面体网格单元,对于楼盖边界以及混凝土表层板与下部分钢结构连接处的网格划分进行适当加密。建立的正六边形网格整体有限元结构模型网格划分如图7所示。

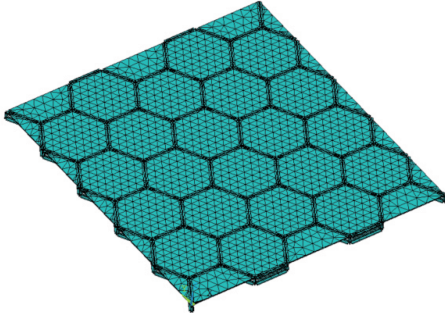


图7 正六边形网格整体有限元结构模型的网格划分
Fig. 7 Regular hexagon mesh finite element structure model meshing

作为对比,建立了同等网格尺寸大小的正交正放网格空腹夹层板有限元结构分析模型,该模型有限单元的选取和网格划分方法同正六边形空腹夹层板楼盖,建立的正交正放网格空腹夹层板楼盖有限元结构模型网格划分如图8所示。

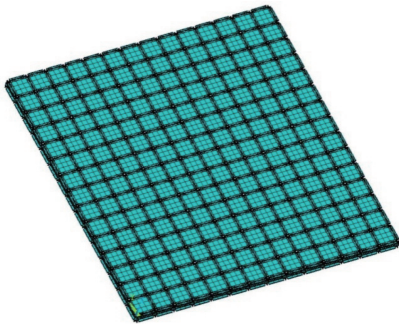


图8 正交正放网格有限元结构模型的网格划分
Fig. 8 Orthogonal orthostatic mesh finite element structure model meshing

3.2 静力分析

在有限元分析结构中,考虑到实际工程中的工作情况,为正六边形蜂窝型空腹夹层板结构添加四边简支约束,即在有限元分析时对楼盖底部周边所有节点均施加 X 、 Y 、 Z 轴3个方向位移为0的边界条件。

结构分析过程中,对楼板面施加均布压力荷载,恒载按 3.5 kN/m^2 输入,活荷载按 2.0 kN/m^2 输入。并考虑结构自重,根据《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068—2018,准永久组合: $1.0\text{DL}+0.5\text{LL}$;基本组合 $1.3\text{DL}+1.5\text{LL}$ (DL代表恒载,LL代表活荷载)。分别计算结构的应力和变形,提取相应结果。通过有限元分析得到正六边形蜂窝型空腹夹层板结构在四周简支情况下的竖向位移云图(如图9所示)

和应力应变。

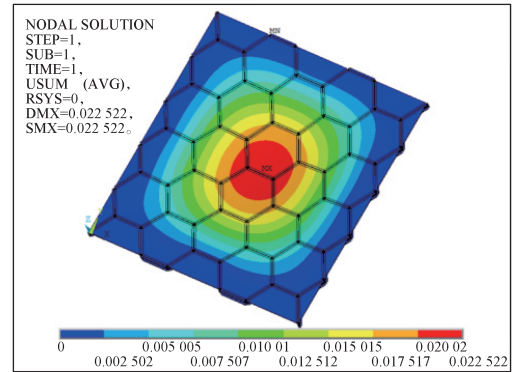


图9 四边简支正六边形蜂窝空腹夹层板楼盖竖向位移云图

Fig. 9 Vertical displacement cloud map of four-sided simply supported regular hexagonal honeycomb hollow sandwich slab floor

由图9所示结构有限元分析结果可知,正六边形蜂窝型空腹夹层板的竖向位移分布与实心板在同样条件下的竖向位移分布类似,说明计算结果基本合理,实际模型的中心最大位移为 22.52 mm ,支座最小位移为 0 mm ,最大挠度与跨度的比值为 $1/1332$,满足《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010规定 $1/300$ 的限值,说明正六边形蜂窝型空腹夹层板整体抗弯刚度大,具有很好的承载能力。

2.3 正六边形模型网格尺寸对整体位移的影响

每一组对比模型中,依据选取不同网格尺寸建立有限元分析结构模型,计算不同网格尺寸正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖在竖向荷载作用下的竖向位移,从而找出网格尺寸对于正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖整体刚度的影响,不同网格尺寸模型的最大挠度如表3所示。

表3 正六边形蜂窝型空腹夹层板最大挠度与网格尺寸对应值

Table 3 Maximum deflection and corresponding grid size of the hexagonal honeycomb fasting sandwich plate

模型组号	网格边长/m	网格边长与跨度比 (长跨比)	最大挠度/mm
1	1.0	0.033	10.944
2	1.5	0.048	14.973
3	2.0	0.068	18.011
4	2.5	0.085	17.221
5	3.0	0.094	25.004
6	3.5	0.121	22.522
7	4.0	0.129	30.796
8	4.5	0.145	57.654

由表3可得,正六边形网格蜂窝盖在当网格边长为 1 m 时,即网格边长与跨度比为 0.033 时,结构的跨中最大挠度为 10.944 mm ,挠度与跨度的比值为

1/2 741; 当网格边长为 4.5 m 时, 即网格边长与跨度比为 0.145 时, 结构的跨中最大挠度为 57.654 mm, 挠度与跨度的比值为 1/538。二者之间跨中最大挠度的比值接近 5.4 倍, 可以看出, 随着网格尺寸与跨度之比的增加, 正六边形网格空腹夹层板楼盖整体刚度随之减少, 在不改变竖向荷载的情况下, 楼盖跨中最大挠度会逐渐增加。

2.4 正交正放模型网格尺寸对整体位移的影响

每一组正交正放网格对比模型的网格尺寸和跨度与对应正六边形蜂窝型网格尺寸相同, 依据选取不同网格尺寸建立有限元分析结构模型, 计算不同网格尺寸正交正放网格空腹夹层板楼盖在竖向荷载作用下的竖向位移, 从而找出网格尺寸对于正交正放网格空腹夹层板楼盖整体刚度的影响, 不同组模型的最大挠度如表 4 所示。

表 4 正交正放网格空腹夹层板最大挠度与网格尺寸对应值
Table 4 Maximum deflection and corresponding value of grid size of the orthogonal grid fasting sandwich plate

模型组号	网格边长 / m	网格边长与跨度比 (长跨比)	最大挠度 / mm
1	1.0	0.034	64.2
2	1.5	0.048	85.8
3	2.0	0.068	98.8
4	2.5	0.085	102.8
5	3.0	0.094	135.1
6	3.5	0.121	129.6
7	4.0	0.129	167.1
8	4.5	0.145	277.6

2.5 正六边形网格与正交正放网格尺寸效应对比分析

为了对比分析正六边形网格蜂窝型空腹夹层板楼盖和正交正放网格空腹夹层板楼盖的网格尺寸效应, 以及研究在不同网格形式下网格尺寸效应对空腹夹层板楼盖整体抗弯刚度的影响, 对正六边形网格蜂窝型空腹夹层板和正交正放网格空腹夹层板跨中最大挠度与长跨比变化关系进行拟合对比分析, 得到的最大挠度 - 长跨比变化关系曲线如图 10 所示。

正六边形网格蜂窝楼盖每组模型在仅改变长跨比的情况下, 施加相同的荷载, 得到对应的最大位移, 并以最大挠度为纵坐标、长跨比为横坐标, 进行数据分析。随着长跨比增加, 在自重以及固定面荷载的作用下, 楼盖的最大挠度不断增加, 由此可以说明, 网格尺寸大小可以影响楼盖的整体抗弯刚度; 长跨比越大, 楼盖刚度越小。由表 3、表 4 和图 10 可得, 正六边形网格蜂窝楼盖在其他条件不变的情况下, 当长跨比为 0.033~0.068 时, 楼盖跨中挠度缓慢增加; 当长跨比继续提升至 0.068~0.125 时, 跨中最大挠度

略有提高但整体保持水平变化趋势; 但当长跨比超过 0.125 后, 楼盖跨中最大挠度迅速增加。

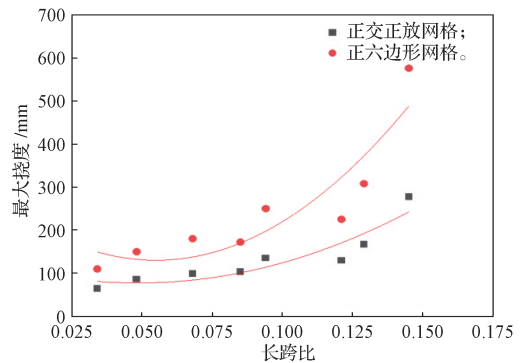


图 10 不同网格形式下长跨比与最大挠度关系曲线

Fig. 10 Curves of the relationship between the maximum deflection of different mesh forms and the length span ratio

当长跨比较小时, 即网格尺寸较密时, 楼盖的整体刚度主要来源于下部的钢结构, 混凝土表层板对于整体的受力影响较小, 但由于单位面积内钢结构的密度较大, 因此楼盖整体的刚度表现出色; 而当长跨比进一步增加, 钢 - 混凝土共同作用的能力得到充分发挥, 此时空腹夹层板的整体刚度主要来源于钢 - 混凝土共同作用, 此时能充分发挥正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的结构优点; 但随着长跨比超过一定范围后, 单位面积内网格密度下降, 钢 - 混凝土共同作用效果下降, 此时楼盖的整体刚度主要由混凝土表层板提供, 楼盖整体刚度迅速下降, 跨中最大挠度迅速提升。

正交正放网格空腹夹层板网格边长与楼盖跨中挠度在一定程度上同样成正相关, 但其变化关系曲线要明显比正六边形空腹夹层板的变化关系曲线平缓; 说明正交正放网格空腹夹层板的网格尺寸效应要明显小于正六边形网格空腹夹层板, 而其钢 - 混凝土共同作用的表现并没有正六边形蜂窝型空腹夹层板的表现充分, 正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的网格优势和三向受力的结构优点在网格尺寸效应上明显优于正交正放网格空腹夹层板楼盖。

通过拟合曲线对比图 10 可以看出, 两种网格布置的空腹夹层板楼盖最大挠度随着长跨比之间的变化趋势大致相同, 但正交正放网格的变化幅度较正六边形网格的小。由此可以看出, 对于网格尺寸相同的正交正放网格空腹夹层板, 其尺寸效应要小于正六边形蜂窝型空腹夹层板, 这是由于正交正放网格的空腹夹层板楼盖用钢量较正六边形网格空腹夹层板楼盖大, 突出了正交正放网格空腹夹层板楼盖的钢结构在整体结构中的作用。

2.6 混凝土表层板厚度对网格尺寸效应的影响

混凝土表层板厚度对于空腹夹层板整体竖向刚

度有较大的影响,随着混凝土表层板厚度增加,空腹夹层板的整体竖向刚度随之增加。为进一步研究不同网格尺寸下混凝土表层板厚度对正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖抗弯刚度的影响,基于建立的正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖的有限元分析模型,控制构件其它参数保持恒定,而仅改变混凝土表层板的厚度,研究混凝土表层板厚度对于正六边形空腹夹层板不同网格尺寸的影响。

分别取 80, 90, 100, 110, 120 mm 建立 5 组有限元分析模型组,每组模型中包含 8 个不同网格尺寸的有限元分析结构模型,共建立了 40 组有限元结构分析模型。分析得到的不同楼板厚度下楼盖跨中最大挠度如表 5 所示。以网格边长与跨度比为横坐标,空腹夹层板的跨中最大位移量作为纵坐标,将混凝土表层板厚度从 80 mm 到 120 mm 所得到的空腹夹层板的跨中最大竖向位移量相连接,得到如图 11 所示不同混凝土表层板厚度的正六边形空腹夹层板楼盖跨中最大挠度随网格边长与跨度比(长跨比)变化曲线。

表 5 不同混凝土表层板厚度下长跨比与最大挠度对应值
Table 5 Corresponding values to the length span ratio and maximum deflection under different concrete surface slab thicknesses

模型组号	长跨比	不同砼板厚度下的最大挠度/mm				
		80 mm	90 mm	100 mm	110 mm	120 mm
1	0.034	114.61	111.96	109.44	108.11	107.54
2	0.048	154.89	151.63	149.73	148.16	147.72
3	0.068	191.55	183.29	180.11	178.42	177.51
4	0.085	183.12	173.66	172.21	171.83	170.48
5	0.094	266.86	253.19	250.04	243.04	235.83
6	0.121	266.24	231.45	225.22	221.26	218.46
7	0.129	346.19	315.52	307.96	296.43	268.11
8	0.145	613.41	588.15	576.54	531.28	476.36

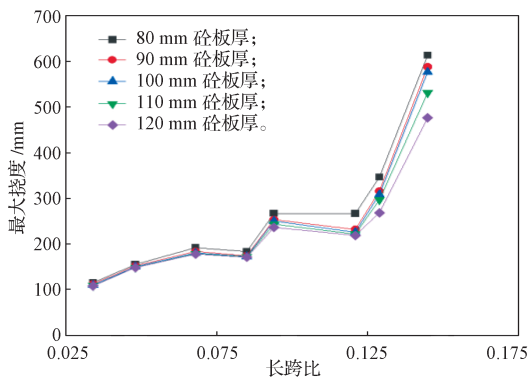


图 11 不同混凝土表层板厚度下长跨比与最大挠度关系曲线
Fig. 11 Relationship curves of the length span ratio and maximum deflection under different concrete surface slab thicknesses

结合表 5 和图 11 可以得出,随着混凝土表层板厚度的增加,正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖跨中最大

挠度值不断降低。当长跨比为 0.033~0.068 时,正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖跨中最大挠度随混凝土表层板厚度增加而降低,而其最大挠度随网格尺寸增加的变化趋势基本保持一致,此时楼盖的整体刚度主要来源于下部的钢结构,混凝土表层板对于楼盖整体受力影响较小,此时,不同混凝土表层板板厚的跨中最大挠度也十分接近。

当长跨比处于 0.068~0.125,混凝土表层板板厚为 80 mm 时,跨中最大挠度随着网格尺寸的增加速度要明显大于其他不同混凝土表层板板厚,随着混凝土表层板板厚的下降,混凝土表层板对于正六边形蜂窝型空腹夹层板楼盖整体受力影响也会降低,此时,随着网格边长与跨度之比的增加,钢-混凝土的共同作用会提前下降。

3 结论

本文对钢-混凝土正六边形蜂窝型空腹夹层楼盖正六边形不同网格尺寸下的抗弯刚度和网格尺寸效应进行了研究。不同尺寸的正六边形蜂窝结构会影响其力学性能,并将正六边形网格空腹夹层板楼盖的尺寸效应与正交正放网格空腹夹层板楼盖的尺寸效应进行对比分析,得出如下结论:

1) 正六边形蜂窝型钢-混凝土空腹夹层楼盖结构的荷载传递、分配合理可靠,荷载三向传递,结构构件之间具有良好的协同性,楼盖整体刚度较大。

2) 正六边形蜂窝型空腹夹层板网格边长与楼盖跨中挠度在一定程度上成正相关。在其他条件不变的情况下,当长跨比为 0.033~0.068 时,楼盖跨中挠度缓慢增加;当长跨比为 0.068~0.125 时,跨中最大挠度略有提高,但变化趋势基本接近水平;但当长跨比超过 0.125 后,最大挠度迅速增加。在正六边形蜂窝型空腹夹层板长跨比较小时,即网格尺寸较密时,楼盖的整体刚度主要来源于下部的钢结构,混凝土表层板对于整体的受力影响较小;而当长跨比进一步增加,钢-混凝土的共同作用慢慢提高。

3) 当混凝土表层板厚度在一定范围内,随着混凝土表层板厚度的增加,其网格尺寸效应减小,而当混凝土表层板厚度小于一定值时,其钢-混凝土的共同组合作用会被削弱。

参考文献:

- [1] 黄建华. 大跨度正六边形混凝土蜂窝形盒式结构的挠度分析[J]. 安徽建筑, 2018, 24(1): 136-137, 195.
HUANG Jianhua. Deflection Analysis of Long-Span Regular Hexagonal Concrete Honeycomb Box

- Structure[J]. *Anhui Architecture*, 2018, 24(1): 136–137, 195.
- [2] 李建伟, 赵勇, 杨斌斌, 等. 多筒体支撑的大跨空间结构设计与研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(1): 19–25.
LI Jianwei, ZHAO Yong, YANG Binbin, et al. Structural Design and Research of Multi-Tube Supported Large-Span Space Truss[J]. *Building Structure*, 2021, 51(1): 19–25.
- [3] 刘增, 马克俭, 卢亚琴. 正交正放混合型空腹夹层板柱结构性能分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(1): 135–140.
LIU Zeng, MA Kejian, LU Yaqin. Performance Analysis of Composite Open Web Sandwich Plate Column Structure[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2021, 19(1): 135–140.
- [4] 马克俭, 黄勇, 肖建春, 等. 钢筋混凝土网架与空腹夹层板空间结构的研究与应用综述[J]. *空间结构*, 1995, 1(3): 28–36, 41.
MA Kejian, HUANG Yong, XIAO Jianchun, et al. Summary of Research and Application of Reinforced Concrete Space Truss and Vierendeel Sandwich Plate Space Structure[J]. *Spatial Structures*, 1995, 1(3): 28–36, 41.
- [5] 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 Bearing Capacity of Honeycomb Hollow Floor[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2021, 35(3): 19–24.
- [6] 潘正斌, 马克俭. 正六边形蜂窝型空腹夹层板盒式楼盖结构静态分析[J]. *中国水运*, 2020, 20(3): 238–240.
PAN Zhengbin, MA Kejian. Static Analysis of Box Floor Structure with Regular Hexagonal Honeycomb Steel Vierendeel Sandwich Plate[J]. *China Water Transport*, 2020, 20(3): 238–240.
- [7] 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.
- [8] 才琪, 马克俭, 刘卓群. 多层大跨度蜂窝形空腹夹层板楼盖刚度分析[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(3): 106–109, 125.
CAI Qi, MA Kejian, LIU Zhuoqun. The Static Stability Analysis of Multi-Storey Large-Span Vierendeel Honeycomb Sandwich Plate Floor[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2016, 33(3): 106–109, 125.
- [9] 徐金涛, 马克俭, 才琪, 等. 上下肋对蜂窝形钢筋混凝土空腹夹层板挠度影响分析[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(6): 54–58.
XU Jintao, MA Kejian, CAI Qi, et al. Influence of Upper and Lower Ribs on the Deflection of the Honeycomb Shape Reinforced Concrete Open-Web Sandwich Plate[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2016, 33(6): 54–58.
- [10] 晁亚茹, 马克俭, 申波, 等. 蜂窝型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.
- [11] 杨彦辉, 马克俭, 卢亚琴, 等. 大直径蜂窝型钢组合空腹夹层板楼盖静力性能分析[J]. *中国水运*, 2021, 21(3): 150–152.
YANG Yanhui, MA Kejian, LU Yaqin, et al. Static Performance Analysis of Large Diameter Honeycomb Steel Composite Hollow Sandwich Slab Floor[J]. *China Water Transport*, 2021, 21(3): 150–152.
- [12] 孙童, 马克俭, 卢亚琴. 大跨度窄长形平面混凝土蜂窝型空腹夹层板的自振特性分析[J]. *中国水运*, 2021, 21(1): 151–152, 155.
SUN Tong, MA Kejian, LU Yaqin. Analysis of Natural Vibration Characteristics of Long-Span Narrow Long Plane Concrete Honeycomb Hollow Sandwich Plate[J]. *China Water Transport*, 2021, 21(1): 151–152, 155.
- [13] 赵子斌. 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构的新型实用计算方法[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(6): 1109–1114.
ZHAO Zibin. A New Practical Method for Calculating the Floor Structure of Reinforced Concrete Sandwich Panel[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(6): 1109–1114.
- [14] 刘盼盼, 王惠, 申波, 等. 起拱对钢筋混凝土空腹夹层板内力影响的参数化分析[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(4): 964–976.
LIU Panpan, WANG Hui, SHEN Bo, et al. Parametric Analysis of the Influence of Internal Force About Arch Camber of Open-Web Sandwich Plate[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(4): 964–976.
- [15] 曾伟益, 罗杰, 肖建春, 等. 钢空腹夹层板的连续倒塌性能分析[J]. *空间结构*, 2020, 26(4): 83–90.
ZENG Weiyi, LUO Jie, XIAO Jianchun, et al. Progressive Collapse Performance Analysis of Steel Vierendeel Sandwich Plate Structure[J]. *Spatial Structures*, 2020, 26(4): 83–90.