

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.03.017

# 大跨度正交斜放空腹夹层板楼盖刚度分析

吴鹏程, 马克俭\*, 卢亚琴, 郭中轩, 刘 聪, 肖 同

(贵州大学空间结构研究中心, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**正交斜放空腹夹层板是在空腹夹层板楼盖基础上发展而来的一种新型大跨度楼盖结构, 具有网格造型美观、受力性能好等特点。为研究新型楼盖结构的刚度, 以拟建工程为例, 基于 Midas Gen 建立有限元模型, 分析各个因素对正交斜放空腹夹层板楼盖刚度的影响。结果表明: 对于现场浇筑一次成型的空腹夹层板, 在设计时应考虑上肋表层混凝土板作为翼缘对空腹夹层板整体刚度的贡献; 上、下肋高度对空腹夹层板刚度影响最大, 在楼盖设计时, 上、下肋肋高宜按网格边长的 1/10~1/15 取用; 当楼盖的长跨比 > 1.5 时, 正交斜放空腹夹层板楼盖相较于正交正放空腹夹层板, 刚度储备大, 抗变形能力更强。

**关键词:**空腹夹层板; 刚度; 参数化分析

**中图分类号:** TU375.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-1891(2021)03-0083-05

## Stiffness Analysis of Large-span Vierendeel Sandwich Panel with Orthogonal-diagonal Placement

WU Pengcheng, MA Kejian\*, LU Yaqin, GUO Zhongxuan, LIU Cong, XIAO Tong  
(Space Structures Research Center, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** The orthogonal-diagonal placed vierendeel sandwich plate is a new type of large-span floor structure developed on the basis of the open web sandwich panel floor, which has the characteristics of beautiful grid shape and good mechanical performance. In order to study the stiffness of the new floor structure, with a proposed project as an example, a finite element model was established based on Midas Gen, and the influence of various factors on the stiffness of the orthogonally laid open-web sandwich slab floor was analyzed. The analysis results show that: for the open-web sandwich slab that is cast once on site, the upper rib surface concrete slab as the flange's contribution to the overall rigidity of the open-web sandwich slab should be considered in the design. The height of the upper and lower ribs has the greatest influence on the rigidity of the open-web sandwich slab; in the design of the floor, the height of the upper and lower ribs should be 1/10~1/15 of the mesh side length; when the length span ratio of the floor is greater than 1.5, the orthogonal inclined Vierendeel Sandwich Panel floor has larger stiffness reserve and stronger anti deformation ability than the normal Vierendeel Sandwich Panel.

**Keywords:** vierendeel sandwich plate; rigidity; parametric analysis

## 0 引言

正交斜放空腹夹层板楼盖是马克俭院士团队在正交正放空腹夹层板楼盖的基础上创新出的一种新型楼盖结构。相较于密肋井字梁楼盖采用实腹肋传递剪力, 空腹夹层板楼盖采用剪力键传递剪力, 克服了密肋井字梁楼盖自重大、制造成本较高的缺点, 且空腹夹层板楼盖的空腹部分, 可作为设

备管线层, 无须再设置管线支架, 可进一步节约建筑造价<sup>[1]</sup>。正是由于以上优点, 空腹夹层板楼盖结构在公共和工业建筑中大面积使用, 工程应用如图 1 所示。

随着空腹夹层板楼盖体系的推广及应用, 空腹夹层板结构理论体系得到了不断的完善与拓展。田子东等<sup>[2]</sup>通过分析某活动中心钢筋混凝土空腹夹层板的施工过程, 介绍了空腹夹层板楼盖的施工

收稿日期: 2021-04-10

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2018]1038); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字(2016)16号)。

作者简介: 吴鹏程(1997—), 男, 山东临沂市人, 硕士研究生, 研究方向: 大跨度空间结构。\*通信作者: 马克俭(1933—), 男, 湖南岳阳人, 教授, 中国工程院院士, 研究方向: 大跨度空间网格结构。

工艺及特点;刘盼盼等<sup>[3-4]</sup>通过参数化分析,分析了钢筋混凝土空腹夹层板各部位起拱对内力的影响,并提出上肋、剪力键及表层板起拱时,应对设计内力进行调整,且空腹夹层板的起拱高度越高,越需要注意对构件所在层的影响;徐增茂等<sup>[5]</sup>通过对比正交正放钢空腹夹层板等代与非等代模型,验证了H型钢弹性模量折减率 $\beta$ 与网格尺寸的关系。



图 1 某活动中心内景图

目前,关于整体现浇钢筋混凝土正交斜放空腹夹层板楼盖刚度研究较少,本文通过建立大量参数化模型,分析边框梁的高度和宽度、上肋和下肋的宽度、上肋和下肋的高度、高跨比及表层板的厚度对空腹夹层板楼盖刚度的影响。并将正交斜放空腹夹层板模型与正交正放空腹夹层板模型进行对比,意在完善空腹夹层板楼盖理论体系,为以后的工程实践提供指导。

### 1 空腹夹层板的构造及类型

空腹夹层板是由上肋、下肋、表层混凝土板及连接上、下肋的剪力键这 4 个部分组成,其空间示意如图 2 所示。空腹夹层板按照材料类型可以分为钢空腹夹层板、钢筋混凝土空腹夹层板及 U 型钢-混凝土组合型空腹夹层板;按照网格形式则可以分为正交正放、正交斜放、斜交斜放及蜂窝型空腹夹层板。由于空腹夹层板具有网格形式美观、受力性能好等优点,其可作为楼盖结构应用于板柱结构、框架结构、盒式结构及框架-剪力墙等结构体系。

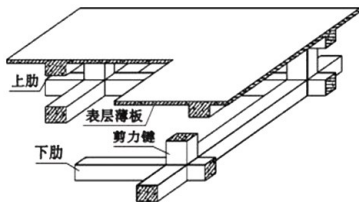


图 2 钢筋混凝土空腹夹层板空间示意

### 2 空腹夹层板的分析方法

#### 2.1 空腹夹层板实用分析法-等效刚度法

目前,进行空腹夹层板分析时主要的分析方法

有有限单元法、连续化分析法和等效刚度法。由于连续化分析法公式烦琐,步骤复杂,所以工程实践中常采用等效刚度法-将空腹夹层板按照抗弯刚度等效原则,将空腹网格梁等效成实腹网格梁截面,再利用设计软件进行内力分析。

等效刚度法<sup>[6]</sup>基本假定如下:(1)空腹夹层板交叉的空腹梁截面符合平面假定的特性;(2)空腹夹层板的网格数应大于 5,以保证其网格板的力学特性;(3)采用变形内力增大系数,考虑结构剪切变形的影响,分析计算时只考虑折算抗弯刚度的影响;(4)空腹夹层板上肋无叠合层时,忽略肋预制板的刚度贡献,当上肋有叠合层时,需要考虑叠合层板参加工作,并根据现行规程确定板参加工作的范围。

#### 2.2 等代实腹梁 $b_L$ 的计算方法

##### 2.2.1 预制带肋板空腹夹层板等代计算

对于表层板使用预制带肋板的钢筋混凝土空腹夹层板,在进行空腹夹层板设计时,应按照等效刚度原则,将空腹梁等代成实腹梁,如图 3 所示。其中  $h$  为空腹夹层板的高度; $h_1$  为上、下肋的高度; $h_2$  为空腹夹层板的净空高度; $b$  为上、下肋的宽度; $b_L$  为实腹梁的折算宽度; $h_3$  为等代后的实腹梁的高度。 $b_L$ 按式(1)计算:

$$b_L = b \left[ 1 - \left( \frac{h_2}{h} \right)^3 \right] \quad (1)$$

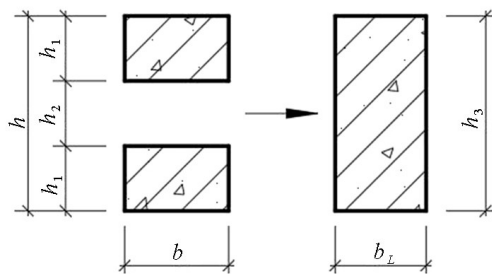


图 3 预制带肋空腹夹层板等代示意

##### 2.2.2 现场整体浇筑空腹夹层板等代计算

对于现场一次性浇筑成型的钢筋混凝土空腹夹层板,在进行空腹夹层板设计时,应考虑上肋表层混凝土板作为翼缘对空腹夹层板整体刚度和承载力的贡献。其中翼缘的有效计算宽度  $b_f$  应按照《混凝土结构设计规范》<sup>[7]</sup> 取用。按照等代刚度原则,计算实腹梁的折算宽度  $b_L$  时,由于空腹梁形心轴不确定,所以应先利用面积矩公式(式(2)),求出空腹梁截面形心轴的坐标  $y_c$ ,

$$y_c = \frac{\sum y_{ci} A_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

式中:  $y_{ci}$  指截面组成部分的形心坐标;  $A_i$  为截面组成部分的面积。

再利用平行移轴公式(式(3))求出空腹梁截面的惯性矩  $I_x$ , 其中  $y$  为微面积  $dA$  到截面形心轴的距离;  $A$  为截面面积。然后根据公式(4)可求出实腹梁的折算宽度  $b_L$ 。等代示意图如图 4 所示。

$$I_x = \int_A y^2 dA \quad (3)$$

$$b_L = \frac{12I_x}{h^3} \quad (4)$$

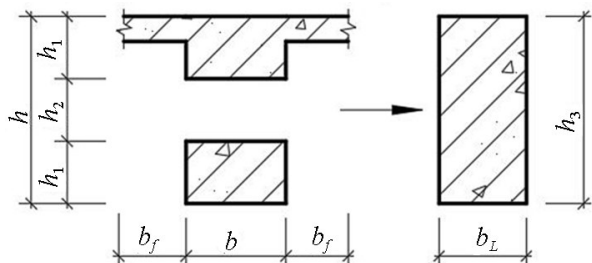


图 4 现场整体浇筑空腹夹层板等代示意

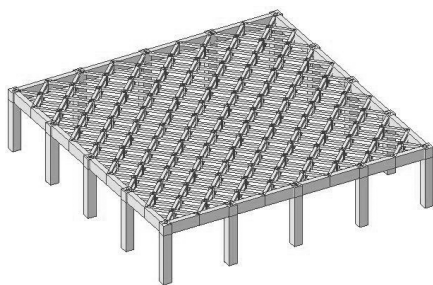


图 5 正交斜放空腹夹层板模型示意

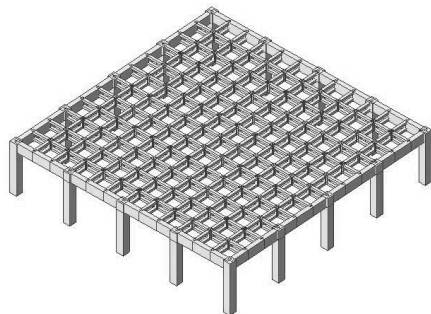


图 6 正交正放空腹夹层板模型示意

### 3 结构分析软件与模型设计参数

#### 3.1 结构分析软件

目前在土木工程行业中, 主要存在 2 类结构分析软件。一类是结构设计软件如 PKPM, ETABS 及 Midas Building 等, 由于这些软件对结构层的概念要求高, 所以此类软件在分析空腹夹层板实际模型时, 会误将空腹夹层板的下肋作为一个标准层计算, 软件分析出错, 故通常利用此类软件的优点对空腹夹层板的等代模型进行计算。另一类是通用分析软件如 Ansys, SAP2000 及 Midas Gen 等, 此类软件对结构层的概念要求不高, 可直接分析空腹夹层板的实际模型, 计算结果也更为精确。

因此本文采用 Midas Gen 分析各个因素对大跨度正交斜放空腹夹层板楼盖刚度的影响, 并同正交正放空腹夹层板模型进行刚度对比分析。

#### 3.2 模型设计参数

分别建立长跨比为 1, 1.5 和 1.75 的正交斜放空腹夹层板模型和正交正放空腹夹层板模型, 如图 5~6 所示, 结构短跨方向为 32 m, 柱距 8 m。采用梁单元模拟边框架梁、空腹夹层板上下肋和剪力键, 并用壳单元模拟表层混凝土板, 通过梁单元与壳单元共用边界模拟表层混凝土与上肋整体现浇。

楼面结构的主要荷载有: 楼面均布恒荷载  $-2 \text{ kN/m}^2$ , 楼面均布活荷载  $-4 \text{ kN/m}^2$ 。同时结构模型的自重系数定义为  $-1.0$ , 即将结构自重转化为恒荷载。

空腹夹层板楼盖高度取 1.2 m, 结构模型中其他构件尺寸、材料参数如表 1 所示。

表 1 结构模型构件尺寸

构件名称	截面尺寸 (mm×mm)	材料	弹性模量 / Gpa	泊松比
上肋	350 × 300	C40	32.6	0.2
下肋	350 × 300	C40	32.6	0.2
表层板	100	C40	32.6	0.2
十字型剪力键	600 × 350	C40	32.6	0.2
边框架梁	1 300 × 600	C40	32.6	0.2

### 4 楼盖刚度的参数分析

对于楼板结构在竖向均布荷载作用下, 楼盖的最大挠度<sup>[7]</sup>可用式(4)计算:

$$w = C_s \frac{qL^4}{EI} \quad (5)$$

式中:  $w$  为楼板结构的最大挠度;  $C_s$  为挠度系数;  $q$  为楼盖承受的竖向均布荷载;  $L$  为楼板结构的跨度;  $EI$  为楼板的抗弯刚度。

其中  $EI$  可用式(6)计算:

$$EI = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (6)$$

式中:  $E$  为楼板材料的弹性模量;  $\mu$  为泊松比。

由式(5)和式(6)联立可知, 楼盖结构的挠度与竖向刚度呈反比关系, 故本文通过研究正交斜放空腹夹层板在楼面竖向均布荷载作用下的挠度来研究楼盖结构的刚度。



### 4.1 边框梁截面刚度对楼盖刚度的影响

本文在 3 类长跨比下,共建立 36 个正交斜放空腹夹层板模型,通过改变边框梁截面高度与宽度,研究边框梁截面刚度对楼盖跨度的影响。边框梁截面高度取值范围为 1.2~1.45 m,边框梁截面宽度取值范围为 0.45~0.75 m,均以 0.05 m 为梯度递增,计算结果如图 7~8 所示。结果表明,随着边框梁截面高度和宽度的增大,空腹夹层板跨中最大挠度逐渐递减,并在边框梁截面高度或宽度取最大值处取得最小值。这是因为随着边框梁截面尺寸的增大,边框梁的刚度也逐渐增大,进而增加了对空腹夹层板楼盖的约束力,使得空腹夹层板楼盖跨中最大挠度逐渐减小。

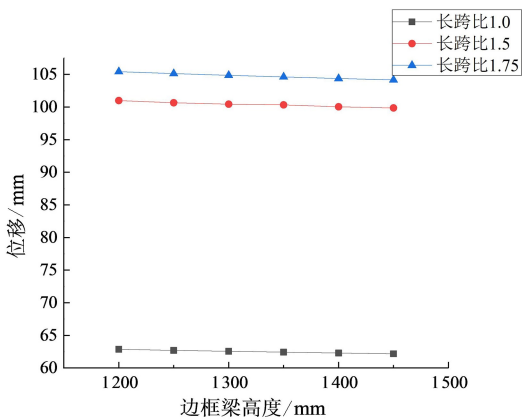


图 7 边框梁截面高度对挠度的影响

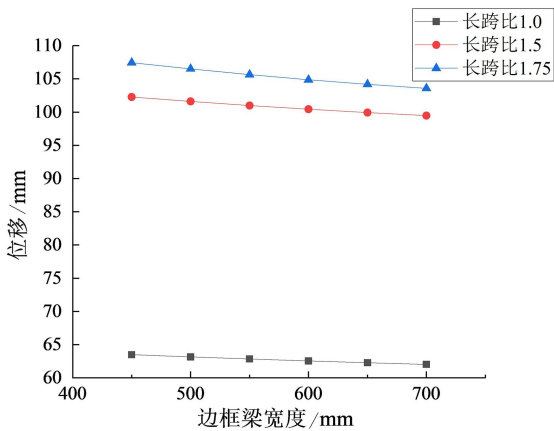


图 8 边框梁截面宽度对挠度的影响

### 4.2 上、下肋截面刚度对楼盖刚度的影响

肋是空腹夹层板的重要组成构件,其作用是将上部楼面荷载传递至竖向承重构件。通常为了施工方便,上、下肋采用相同的截面尺寸。为了研究上、下肋截面高度和截面宽度对正交斜放空腹夹层板楼盖刚度的影响,共建立 42 个结构模型,通过改变上、下肋截面高度和截面宽度探究二者对正交斜放空腹夹层板楼盖刚度的影响。

#### 4.2.1 上、下肋截面高度对楼盖刚度的影响

随着上、下肋截面高度的增加,空腹夹层板楼盖跨中挠度逐渐减小(图 9)。在 3 类长跨比下,正交斜放空腹夹层板楼盖的跨中最大挠度分别减小 38.8%、37%和 34%,这表明上、下肋截面高度对空腹夹层板楼盖的刚度影响较大,但是当上、下肋截面高度大于 300 mm 即空腹夹层板网格尺寸的 1/10 左右时,随着上、下截面高度的增大,空腹夹层板楼盖跨中最大挠度变化率变缓。

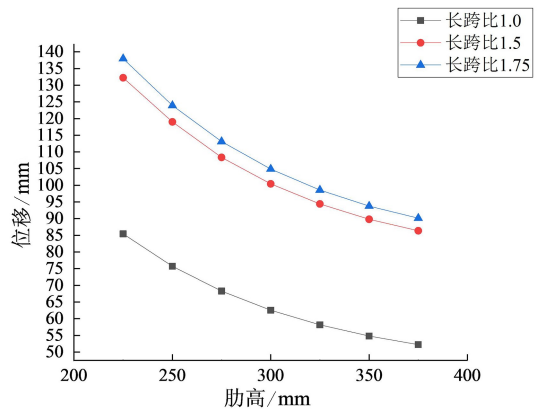


图 9 上、下肋截面高度对挠度的影响

#### 4.2.2 上、下肋截面宽度对楼盖刚度的影响

上、下肋截面宽度对楼盖挠度的影响如图 10 所示。随着上、下肋截面宽度的增加,空腹夹层板楼盖跨中挠度分别减小 13.6%、12.9%和 13.2%。这是因为上、下截面宽度与上、下截面刚度呈线性关系,所以增加上、下肋截面宽度可增大空腹夹层板楼盖刚度,但对空腹夹层板楼盖刚度的影响不如上、下截面高度那么显著,故在工程实践中空腹夹层板上、下肋截面宽度常采用 1.5~3.5 倍的上、下肋截面高度。

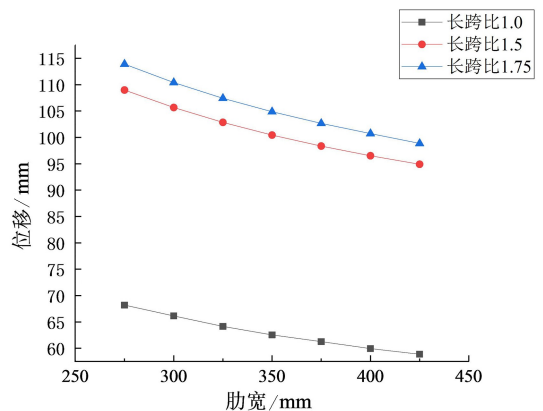


图 10 上、下肋截面宽度对挠度的影响

#### 4.4 表层混凝土板厚度对楼盖刚度的影响

表层混凝土板是空腹夹层板楼盖中直接承受

楼面荷载的构件。为研究表层混凝土板的厚度对空腹夹层板楼盖刚度的影响, 共建立 21 个模型, 板厚取表层板板跨的 1/40~1/22, 以 10 cm 为梯度递增, 计算结构如图 11 所示。结果表明, 随着表层混凝土板厚度的增加, 空腹夹层板跨中最大挠度逐渐减小, 这是因为表层混凝土板在增加空腹夹层板楼盖刚度的同时, 还可以改变上肋的应力分布, 进而对正交斜放网格起到水平支撑作用。在 3 种长跨比下, 表层混凝土板对空腹夹层板楼盖跨中最大挠度减小率分别为 5%、4.01% 和 3.8%。所以在工程实践中, 对于现场一次性浇筑成型的钢筋混凝土空腹夹层板在设计时, 应该考虑上肋表层混凝土板作为翼缘对空腹夹层板整体刚度的贡献。

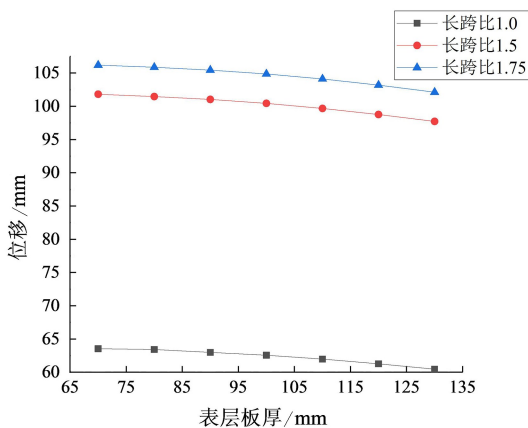


图 11 表层板厚度对挠度的影响

#### 4.5 跨高比对楼盖刚度的影响

跨高比是指空腹夹层板楼盖短跨跨度同空腹夹层板高度的比值。空腹夹层板的跨高比一般取 1/20~1/30<sup>[8]</sup>, 共建立 21 个模型, 通过改变空腹夹层板的高度, 探究跨高比对空腹夹层板楼盖刚度的影响, 结果如图 12 所示。结果表明, 在 3 种长跨比模型下, 随着跨高比的增大, 空腹夹层板楼盖跨中最大挠度分别增加 18.4%、20.7% 和 21%。所以工程实践中, 可以采用减小跨高比提高空腹夹层板楼盖的整体刚度, 但跨高比不宜过小, 还要满足空腹率以保证水电管线的布置。

#### 4.6 网格形式对楼盖刚度的影响

正交正放空腹夹层板与正交斜放空腹夹层板是目前工程实践中应用最多的空腹夹层板结构形式。建立 6 个模型, 对比 2 种网格形式对楼盖刚度的影响, 结果如图 13 所示。当楼盖结构的长跨比 ≤ 1.5 时, 正交正放空腹夹层板与正交斜放空腹夹层板跨中最大挠度均能满足规范要求, 且正交斜放空腹夹层板楼盖跨中最大挠度明显小于正交正放空

腹夹层板楼盖。但从经济角度上讲, 长跨比 ≤ 1.5 时, 采用正交正放空腹夹层板用料更省, 更为经济。当楼盖结构的长跨比 > 1.5 时, 正交正放空腹夹层板楼盖跨中最大挠度为 115.21 mm, 为跨度的 1/277.75, 正交斜放空腹夹层板为 104.87 mm, 为跨度的 1/305, 满足规范要求, 这表明正交斜放空腹夹层板楼盖相较于正交正放空腹夹层板整体刚度更大, 抗变形能力更强。

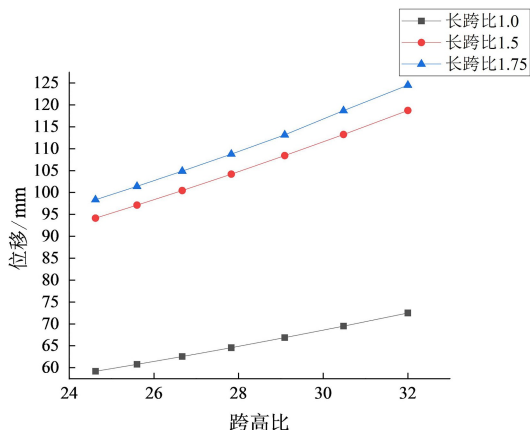


图 12 结构跨高比对挠度的影响

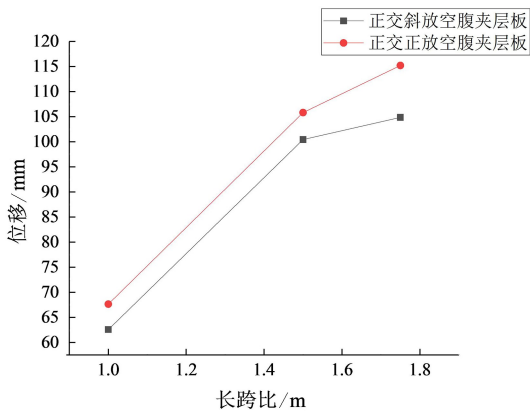


图 13 网格形式对挠度的影响

### 5 结论

- 1) 增大表层混凝土板厚度在一定程度上可提升空腹夹层板整体刚度, 对于现场浇筑一次成型的空腹夹层板, 在设计时应考虑上肋表层混凝土板作为翼缘对空腹夹层板整体刚度的贡献。
- 2) 提高上、下肋截面高度可显著提升正交斜放空腹夹层板楼盖的整体刚度, 但上、下肋截面不宜超过空腹夹层板网格尺寸的 1/10。
- 3) 减小空腹夹层板楼盖的跨高比在一定程度上可以提升正交斜放空腹夹层板楼盖的整体刚度, 但是跨高比不宜太小, 否则不利于水电管线的布置。

版), 2018, 33(1): 14-17.

- [9] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4003-4010.
- [10] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237.
- [11] 石立明. 邯郸黑龙港平原地下水水文地球化学特征及水质评价研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [12] 赵玉. 渭河干流浅层地下水与地表水中重金属 Cd 污染特征及风险评价[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 267-277.
- [13] 李文赞, 李叙勇, 王慧亮, 等. 濉阳河主要水环境污染物空间分布特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2814-2819.

(上接第 87 页)

4) 楼盖结构的长跨比 $>1.5$ 时, 正交斜放空腹夹 大, 抗变形能力更强。  
层板楼盖相较于正交正放空腹夹层板整体刚度更

#### 参考文献:

- [1] 黄勇, 马克俭, 张华刚, 等. 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖体系的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 1997(6): 55-64.
- [2] 田子东, 孙铭辰, 申波, 等. 多层大跨度钢筋混凝土空腹夹层板楼盖施工方法[J]. 四川水泥, 2020(10): 160-161.
- [3] 刘盼盼, 申波, 马克俭, 等. 影响空腹夹层板起拱后内力的因素分析[J]. 混凝土, 2019(11): 154-158+162.
- [4] 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.
- [5] 徐增茂, 马克俭, 郑晋阳, 等. 大跨正交正放空腹夹层板楼盖刚度分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(4): 911-919.
- [6] 马克俭, 张华刚, 郑涛. 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.
- [7] 才琪, 马克俭, 刘卓群. 多层大跨度蜂窝形钢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.
- [8] DB22/48-2005 钢筋混凝土空腹夹层板楼盖结构技术规程[S]. 贵阳: 贵州省建筑厅, 2005.

(上接第 91 页)

- [3] 刘东甲. 完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(5): 683-687.
- [4] MIDDENDORP P, REIDING F J. Determination of discontinuities in piles by TNO integrity testing and signal matching technique[C]//Proceeding of the Third International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piles. Rotterdam: AA Balkema, 1988: 33-43.
- [5] 陈凡, 王仁军. 尺寸效应对基桩低应变完整性检测的影响[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 92-96.
- [6] 陈义全, 任志国, 刘东甲. 非完整桩瞬态纵向振动的模拟计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版). 2004, 27(10): 1210-1214.
- [7] 刘东甲. 指数型变截面桩中的纵波[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1066-1071.
- [8] JIANG Jing, LIU Dongjia, LU Zhitang, et al. A study on low strain integrity testing of platform-pile system using staggered grid finite difference method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 67: 345-352.
- [9] 姜静, 姚志刚, 陈钦元, 等. 双速度法在承台桩系统中的完整性检测研究[J]. 安徽广播电视大学学报, 2017, 176(1): 124-128.
- [10] 刘东甲. 纵向振动桩侧壁切应力频域解及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 544-546.