

基于Ansys的无上弦空腹桁架组合楼盖受力性能分析

贾立峰, 汪清春

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年4月15日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月23日

摘要

无上弦空腹桁架组合楼盖作为新型组合体系, 由混凝土板、砣块(直腹杆)、栓钉抗剪连接件、钢制下弦杆组成。为了研究无上弦空腹桁架组合楼盖结构的受力性能, 使用Ansys建立有限元模型并且介绍了建模方法与过程, 对无上弦空腹桁架组合楼盖的仿真模拟有实际参考价值。

关键词

无上弦空腹桁架组合楼盖, 挠曲变形, 应力应变分布, 仿真模拟

Ansyz-Based Stress Performance Analysis of Chordless Open Web Truss Composite Building Cover

Lifeng Jia, Qingchun Wang

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 15th, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: May 23rd, 2024

Abstract

As a new type of modular system, the chordless hollow web truss modular floor cover consists of concrete slab, weight block (straight web), spigot shear connectors, and steel bottom chord. In order to study the force performance of the topline-less open web truss composite floor cover structure, a finite element model is established by using Ansys and the modeling method and process are introduced, which is of practical reference value for the simulation of the topline-less

hollow web truss composite floor cover.

Keywords

Open Web Truss Combined Floor Cover without Chord, Flexural Deformation, Stress-Strain Distribution, Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

组合楼盖是多层和高层钢结构房屋经常采用的楼面体系, 具有受力合理、充分利用了钢材和混凝土各自的材料特性等优点。对于钢桁架 - 混凝土板组合楼盖, 其钢桁架由上弦杆、腹杆和下弦杆组成, 其中腹杆包括竖向腹杆和斜腹杆, 为管线穿越留有空间, 但由于有斜腹杆的存在, 可以穿越管线的空间也较小, 另外, 钢桁架上弦杆的截面高度也会占用建筑层高。在提高建筑空间使用效率与方便不同形状的管线穿越方面无上弦空腹桁架组合楼盖具有显著优势, 如图 1 所示与常规的钢桁架组合楼盖相比, 该组合楼盖取消了斜腹杆和钢上弦杆, 大大增加了腹杆之间的孔洞面积, 有利于较大的设备管线的穿越。



Figure 1. Open web truss combined floor cover without chord
图 1. 无上弦空腹桁架组合楼盖

钢桁架 - 混凝土组合梁与无上弦空腹桁架组合楼盖同样具有以混凝土板作为组合结构上弦结构, 采用空腹桁架式腹杆的显著特征, 近年来关于钢桁架 - 混凝土组合梁的有限元模拟研究渐渐变多。谈遂[1]利用有限元建模研究了节间宽高比、腹杆刚度与剪力连接程度对钢桁架 - 混凝土组合梁性能的影响。汪洋[2]研究了混凝土板厚度、宽度、腹杆截面尺寸、桁架上弦托板宽度及抗剪连接程度对抗弯性能的影响。陈荣[3]同样借助有限元模型分析了混凝土板厚、混凝土板宽节点间距等因素对钢桁架组合梁的影响。该研究中发现混凝土板厚对组合桁架受力性能有积极影响, 混凝土板较厚的模型承载力更高挠度更小, 而混凝土板宽影响较小, 同时节点间距并不是越小越好, 而是存在一个合理的间距。王祥[4]也研究了跨高

比、高厚比、钢材屈服强度和混凝土强度等因素对钢桁架-混凝土组合楼盖的抗弯性能的影响。

因为国内外对于无上弦空腹桁架组合楼盖的有限元模拟分析较少, 本文基于已经完成的两榀无上弦空腹桁架组合楼盖的静力加载试验和材性试验, 使用 Ansys 对无上弦空腹桁架组合楼盖建立有限元模型, 介绍了建模过程, 最后对无上弦空腹桁架组合楼盖受力性能进行分析, 改变不同混凝土板厚度进行参数化分析, 研究不同板厚对组合楼盖受力性能的影响。

2. 有限元建模方法

2.1. 材料的本构模型

钢材: 本文使用较为经典的双线性随动强化模型(BKIN)表征钢材的本构关系, 该模型同时包含弹性和塑性斜率, 为理想弹塑性本构, 使用 Von-mises 屈服准则。Von-mises 屈服准则[5]同时考虑了第一、第二、第三主应力, 是基于剪切应变能的一种等效应力, 其等效应力表达式为公式(1):

$$\sigma_s = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力。

混凝土: 本文结合材性试验结果与试验过程中混凝土板的破坏特征, 选用多线性随动强化模型(MKIN), 以 Hongnestad 公式为依据定义混凝土本构模型。Hongnestad 表达式[6] [7]是目前应用最为广泛的混凝土本构曲线之一, 主要分为抛物线上升段和斜直线下降段两个阶段, 表达式为(2):

$$\sigma = \begin{cases} f_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ f_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right) \right] & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (2)$$

栓钉连接件: 静力加载试验中作为混凝土板与钢桁架连接所用的栓钉连接件为直径 6 mm 的螺钉代替, 其长度为 30 mm。由于静力加载试验中无上弦空腹钢桁架的破坏模式并不是栓钉连接件破坏或混凝土压碎破坏, 采用钢-混凝土组合桥梁设计规范[8] (GB 50917-2013)中提出的栓钉连接件极限承载力计算方法:

$$N_u^c = 0.7 A_s f_{yk} \gamma \mu_{Qf} \quad (3)$$

式中: A_s 为栓钉横截面面积; f_{yk} 为栓钉屈服强度标准值; γ 为栓钉极限抗拉强度与屈服强度之比; μ_{Qf} 为钢材抗拉强度不定性随机变量平均值统计参数, 取 $\mu_{Qf} = 1.28$ 。

2.2. 单元选择及网格划分

本模型中钢桁架及混凝土板都采用 SOLID65 三维实体单元, 改单元共有 8 个节点, 每个节点分别有三个自由度 UX, UY 和 UZ, 且具有开裂、压碎、塑性变形和蠕变等特性, 适用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。COMBIN39 称为非线性弹簧单元, 是一种具有非线性的广义力-变形曲线(简称 F-D 曲线)的单向单元, 适用于各种分析, 考虑到栓钉连接件的受力特点, 采用 COMBIN39 单元来模拟无上弦空腹钢桁架与混凝土板间的连接。混凝土板网格尺寸设置为 40 mm, 钢桁架网格尺寸设置为 10 mm。

2.3. 边界条件及荷载布置

本文有限元模型研究简支组合楼盖的受力性能, 分别在其两端设置有固定铰支座和滑动铰支座。在

ANSYS 建模过程中, 将坐标原点端设置为固定铰支座一端, 将远离坐标原点的一端设置为滑动铰支。荷载布置为单调静力加载, 在两个集中加载点处布置有宽为 160 mm 的刚性垫块, 垫块传荷均匀且变形可忽略不计, 以实现四点弯曲。在有限元模型混凝土板上表面加载点处分别施加宽度为 160 mm 的面荷载, 其次, 考虑到组合楼盖自重对其变形的影响, 有限元模型整体施加竖直向下的重力加速度。

3. 有限元结果分析

3.1. 挠曲变形

如图 2 所示为无上空腹桁架组合楼盖有限元模型的挠曲变形态, 其整体弯曲形状总体呈现近似“倒梯形”的形状, 即左右三分点间的跨中部分的位移大致相同, 左右弯剪段由支座处到三分点处挠度逐渐加大。

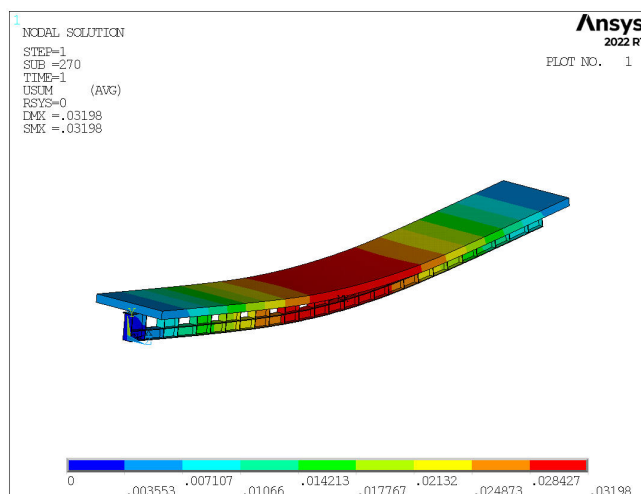


Figure 2. Finite element deflection patterns

图 2. 有限元挠度形态

3.2. 应力应变分析

3.2.1. 应力分析

如图 3 所示为无上空腹桁架组合楼盖的整体应力云图, 可以发现其主要由钢下弦杆来承受拉力, 在荷载逐渐增大的过程中, 钢下弦杆会从跨中逐步向两侧进入屈服状态, 在破坏时可以发现约 2/3 跨度区域进入了屈服状态。腹杆在应力分布图中处于颜色较浅区域, 大部分都未进入屈服状态。对比处于弯剪段与纯弯段腹杆的应力可以发现纯弯段大部分处于承受压应力状态, 而弯剪段腹杆都处于受拉状态, 说明弯剪段受力大于纯弯段腹杆。

图 4(a)所示为混凝土图板顶的等效应力云图, 可以明显发现在加载区域出现了明显的应力集中现象, 两应力集中区域以钢下弦杆为中轴呈现对称分布。图 4(b)为混凝土板底等效应力图, 同样在加载区域底部出现了应力集中, 但同时也应注意到在组合楼盖空腹范围内的混凝土板底同样出现了较大的应力。

图 5 为试件在 X-Y 平面的剪应力分布图, 图中清楚地显示了剪应力在钢桁架中分布情况, 即在弯剪段沿腹杆及腹杆间下弦杆的对角线附近剪应力较大, 且越靠近支座处剪应力越大。值得注意的是实腹区域下弦杆的剪应力明显低于空腹区域下弦杆的剪应力, 且被加劲肋板分割成两种剪应力分布区域, 说明加劲肋的设置对腹杆弦杆节点的应力分布及变形有一定的影响。

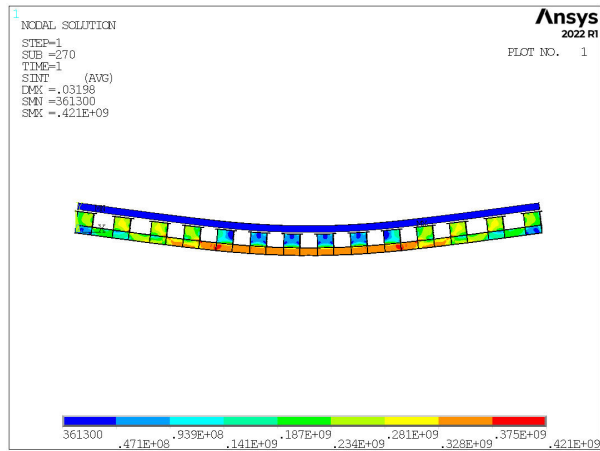


Figure 3. Overall stress map of combined building cover
图 3. 组合楼盖整体应力云图

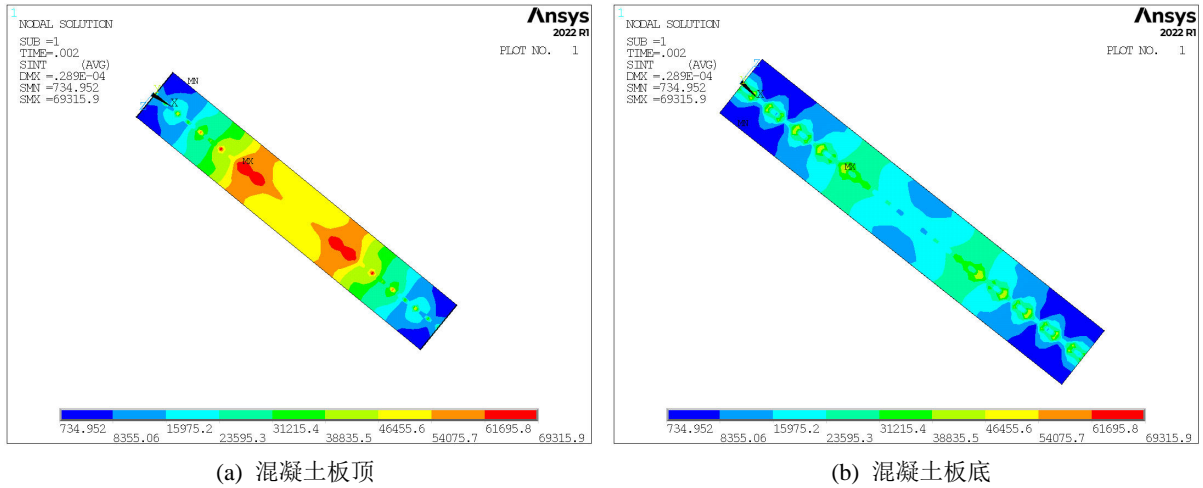


Figure 4. Concrete slab equivalent force cloud
图 4. 混凝土板等效应力云图

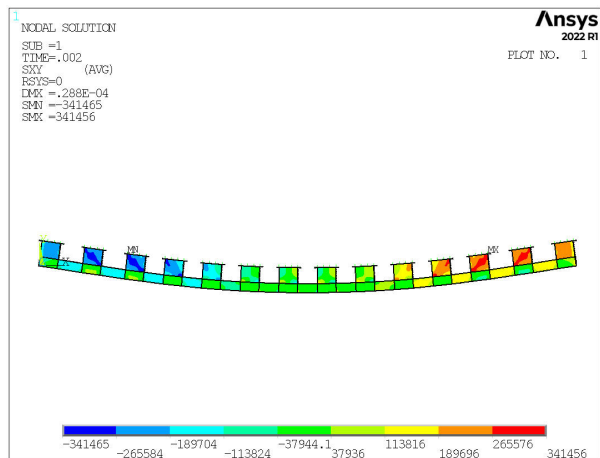
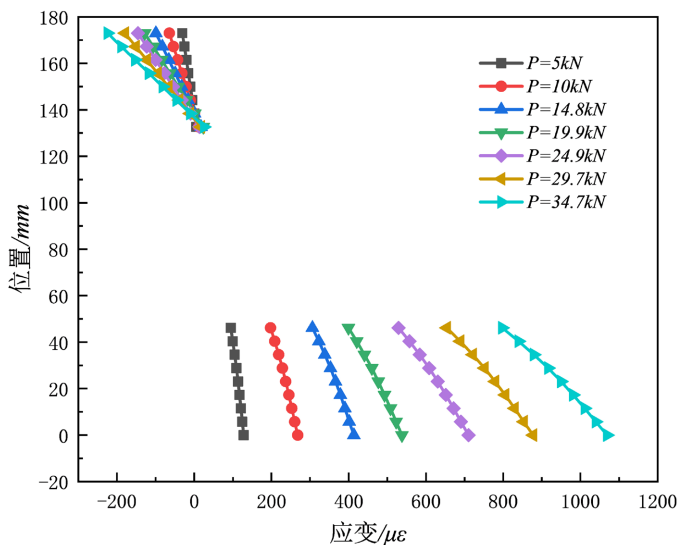


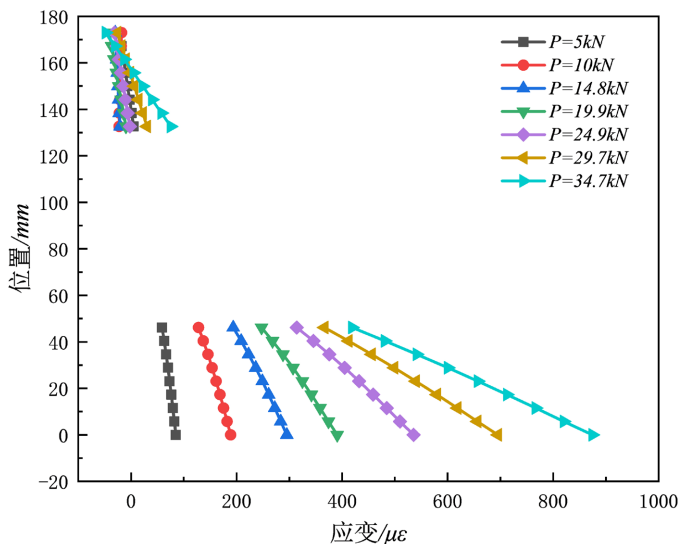
Figure 5. X-Y plane shear stress distribution
图 5. X-Y 平面剪应力分布

3.2.2. 应变分析

图 6 为弹性阶段跨中空腹截面与右弯剪段空腹截面的应变沿梁高分布图, 图 6(a)中在弹性阶段的每一级荷载条件下, 截面的应变可以连成一条斜率不变的直线, 呈明显的线性分布, 说明跨中空腹截面应变符合平截面假定的某些特征, 且其中性轴与试验结果相同都位于混凝土板上侧 3 mm 左右的范围。而右弯剪段的应变分布于跨中截面不同, 其应变呈折线型分布, 如图 6(b)所示, 且其截面中性轴在弹性阶段末期就抬高至混凝土板上侧。



(a) 跨中空腹截面



(b) 右弯剪段空腹截面

Figure 6. Strain distribution of hollow section

图 6. 空腹截面应变分布图

3.3. 不同混凝土板厚对无上弦空腹桁架组合楼盖力学性能的影响

如表 1 所示为有不同混凝土板厚的有限元模型结果, 用 h_c 表示混凝土板厚度, 从表中数据可以发现:

混凝土板厚度的提升可以提高组合楼盖的整体承载力, 但提升幅度不会很大, 厚度为 50 mm 的试件能承受的极限荷载为厚度为 40 mm 有限元模型的 105%。图 7 为根据有限元模型数据绘制荷载 - 挠度关系曲线, 结合表 1 可以发现: 混凝土板厚度的提升可以提高组合楼盖的整体抗弯刚度, 但其最大挠度会随板厚的提升而下降从而降低组合楼盖结构的整体延性。但如果厚度过低, 其抗弯刚度较小, 获得较好的延性的同时其整体的舒适度会降低。

Table 1. Ultimate strength and maximum deflection of combined floor cover with different slab thicknesses

表 1. 不同板厚下的组合楼盖极限强度与最大挠度

	$h_c = 30 \text{ mm}$	$h_c = 35 \text{ mm}$	$h_c = 40 \text{ mm}$	$h_c = 45 \text{ mm}$	$h_c = 50 \text{ mm}$
极限荷载/kN	59.83	62.17	62.50	63.23	65.30
最大挠度/mm	128.24	126.61	78.18	58.29	57.11

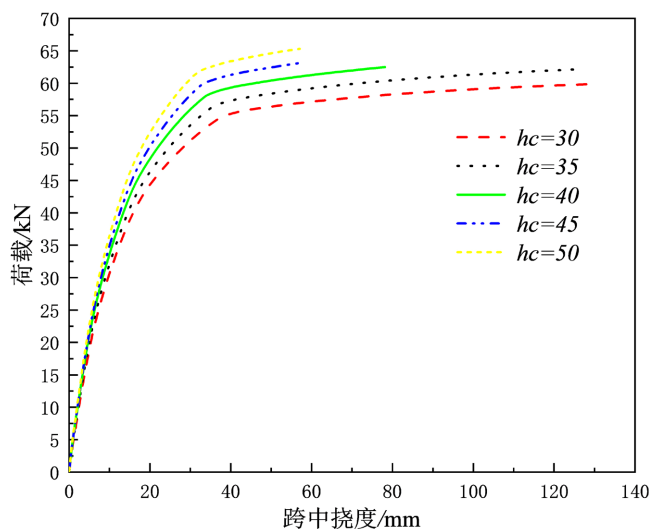


Figure 7. Strain distribution of hollow section

图 7. 不同板厚下有限元模型的荷载 - 挠度关系对比

4. 结语

本文主要介绍了无上弦空腹桁架组合楼盖有限元模型的建立方法, 对有限元模拟结果进行分析, 得出如下结论:

- 1) 无上弦空腹桁架组合楼盖有限元模型的整体变形呈现“倒梯形”的形状。
- 2) 下弦杆为主要的受拉构件, 从跨中逐步向两侧进入屈服状态, 在破坏时可以发现约 2/3 跨度区域进入了屈服状态。
- 3) 相较于钢下弦杆, 腹杆主要承受传递剪力及连接下弦杆与混凝土板的作用。
- 4) 混凝土板顶和板底在加载区域会出现严重的应力集中, 两应力集中区域以钢下弦杆为中轴呈现对称分布。
- 5) 实腹区域下弦杆的剪应力明显低于空腹区域下弦杆的剪应力, 加肋的设置对腹杆弦杆节点的应力分布及变形有一定的影响。
- 6) 组合楼盖跨中空腹截面应变呈线性分布, 中和轴位于混凝土板底部, 具有平截面假定的某些特征,

而右弯剪段空腹截面呈折线型分布。

7) 无上弦空腹钢桁架组合楼盖在设计时需要根据结构的舒适度、承载性能和结构高度要求去选择合适的混凝土板厚。

参考文献

- [1] 谈遂. 钢桁架-混凝土组合梁空间有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [2] 汪洋. 钢-混凝土组合桁架梁抗弯性能研究[D]: [博士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [3] 陈荣. 空间管桁架混凝土组合梁受弯性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.
- [4] 黄华琪, 刘钊, 张建东. 桁腹混凝土梁桥的组合截面等效抗弯刚度[J]. 结构工程师, 2011, 27(4): 73-77. <https://doi.org/10.15935/j.cnki.jggcs.2011.04.003>
- [5] 金忠谋, 李红云. 材料力学[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994: 8-9.
- [7] 李义强, 王新敏, 陈士通. 混凝土单轴受压应力-应变曲线比较[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 75-78.
- [8] 周安, 戴航, 刘其伟. 栓钉连接件极限承载力及剪切刚度的试验[J]. 工业建筑, 2007(10): 84-87.