

上海某高层建筑带长悬挑转换桁架结构分析

张利花

上海众鑫建筑设计研究院有限公司, 上海

收稿日期: 2023年7月29日; 录用日期: 2023年8月19日; 发布日期: 2023年8月30日

摘要

某高层商办楼由于建筑立面效果要求, 在南主出入口处3层立面存在大跨度悬挑转换桁架结构, 悬挑外端抬柱三层, 悬挑长度为9.4 m, 属于长悬挑结构的超限高层建筑。对悬挑转换桁架结构进行了小震下的单榀桁架的计算分析; 对转换桁架的关键构件进行大震下的抗震性能分析; 对大跨度悬挑桁架结构的楼盖作舒适度验算分析; 对悬挑部位的楼层作楼板应力分析以及对桁架的关键构件节点进行大震下的有限元分析, 确保该结构转换桁架安全、可靠。

关键词

悬挑转换桁架, 抗震性能, 舒适度, 节点有限元

Analysis of a High-Rise Building with Long Cantilever Truss Transfer Structure in Shanghai

Lihua Zhang

Shanghai Zhongxin Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: Jul. 29th, 2023; accepted: Aug. 19th, 2023; published: Aug. 30th, 2023

Abstract

Due to the facade effect requirements of a high-rise commercial office building, there is a long-span cantilever transfer truss structure in the three-story facade of the south main exit entrance, and the cantilever outer end lifting column has three layers. The cantilever length is 9.4 m, which belongs to the over-limit high-rise building with a long cantilever structure. A single truss is calculated and analyzed for the cantilever transfer truss structure; the seismic performance of the key components of the transfer truss is analyzed; the comfort checking analysis of the floor of the

long-span cantilever truss structure is made; the floor stress analysis of the overhanging part of the floor is made and the key component nodes of the truss are analyzed by finite element method, ensure the safety and reliability of the structural transfer truss.

Keywords

Overhung Transfer Truss, Seismic Performance, Comfort Level, Node Finite Element

Copyright © 2023 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. 工程概况

本工程位于上海嘉定区,总建筑面积约为7万 m^2 ,属于超限高层商住项目。该项目结构总高85.65 m。地上19层,每层层高4.5 m,主要用途为会议室和办公用房。地下2层,主要用途为汽车车库和设备用房。根据建筑平面布置需要,采用核心筒偏置的钢框架(矩形钢管混凝土柱+钢梁)-钢筋混凝土核心筒结构体系。根据建筑立面需要,南主出入口处3层楼面以下无柱空间需求,本项目3层立面存在立面大跨度悬挑转换结构,悬挑转换跨度为9.4 m,详见图1,采用桁架转换结构形式,桁架布置范围为悬挑跨及悬挑内侧一跨,保证力的有效传递。桁架计算模型详见图2,桁架转换结构受力比较明确,自身质量较轻,具有很好的抗震能力[1]。

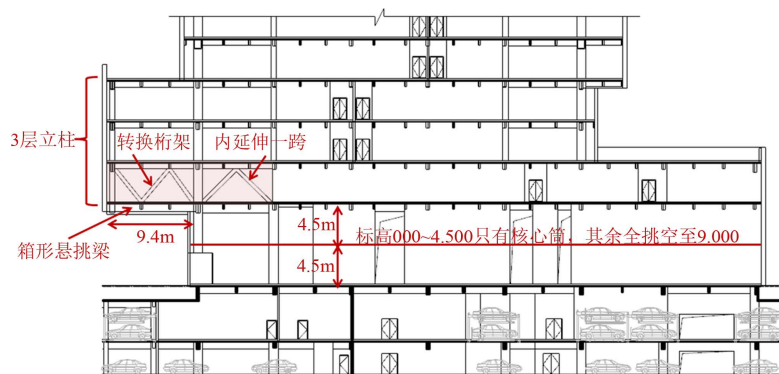


Figure 1. Typical profile

图1. 典型剖面图

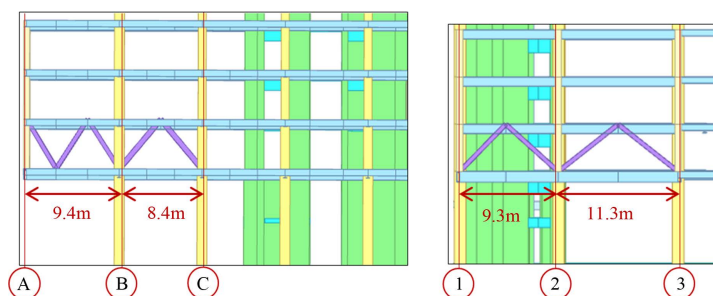


Figure 2. Calculation model of cantilever truss

图2. 悬挑桁架计算模型

2. 悬挑转换桁架的结构计算分析

2.1. 单榀桁架计算

转换层承受垂直荷载以及多层荷载，使得转换层结构的内部存在较大的应力[1]，为了提高结构分析的全面性，不仅对项目的整体结构进行分析，还需要根据桁架本身的受力特性进行二维设计。采用 YJKS 5.2.1 软件指定建筑 A 轴~C 轴处的桁架进行单榀计算。由于本项目悬挑桁架长 9.4 m，桁架计算时考虑了竖向地震作用的影响。图 3 为桁架在小震作用下的承载力验算结果，从图中看出桁架的最大组合应力比值为 0.86，满足计算要求。图 4 为桁架的变形验算结果，根据《钢结构设计标准》[2]，正常使用工况下挠度验算：恒荷载 + 活荷载标准值组合工况下悬挑钢结构三层端部的挠度最大值为 28.37 mm，相对于其跨度的挠跨比为 1:662 (悬臂构件的计算跨度按照实际悬臂的 2 倍取用)，满足规范 1:400 的限值要求。

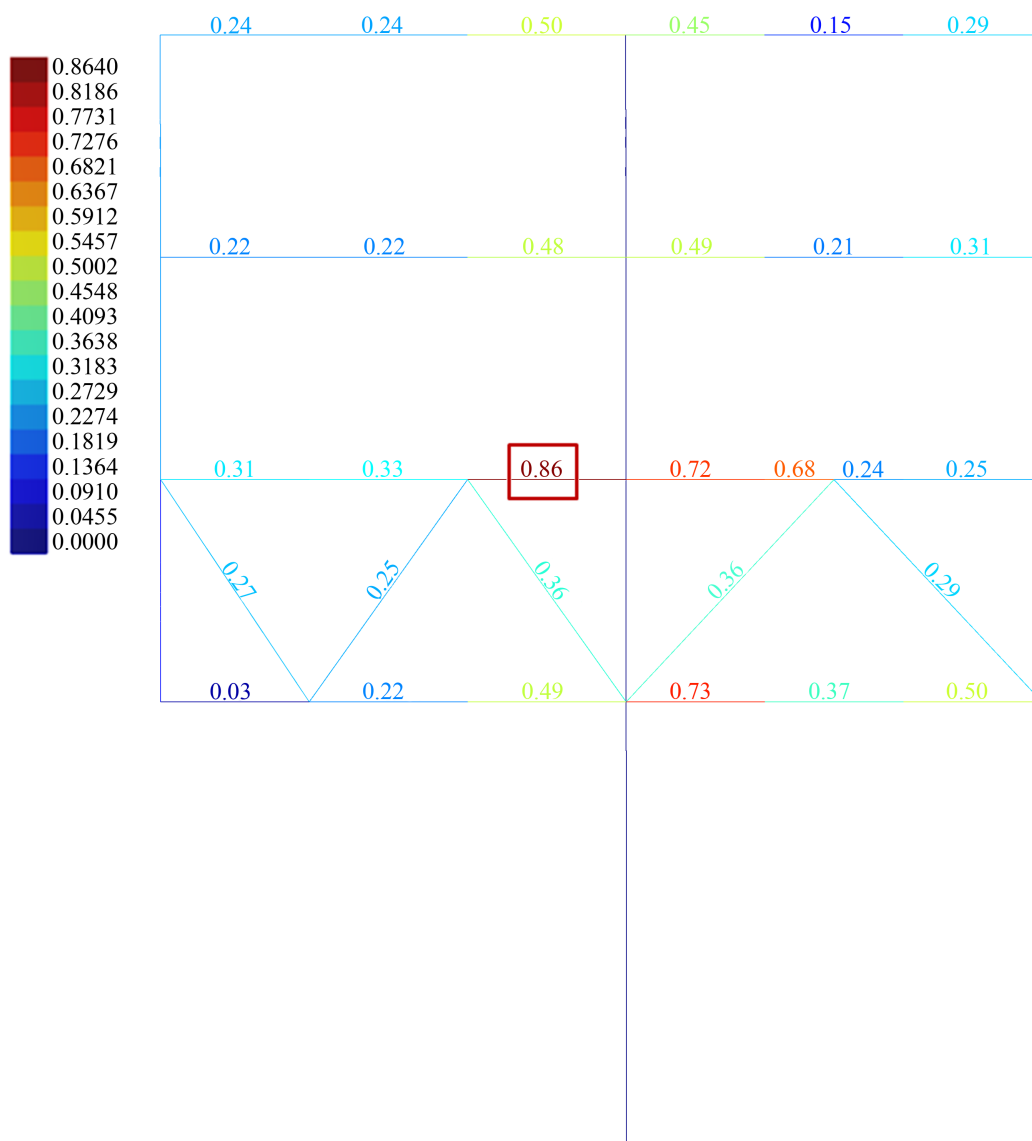


Figure 3. Combined stress ratio of cantilever truss

图 3. 悬挑桁架组合应力比

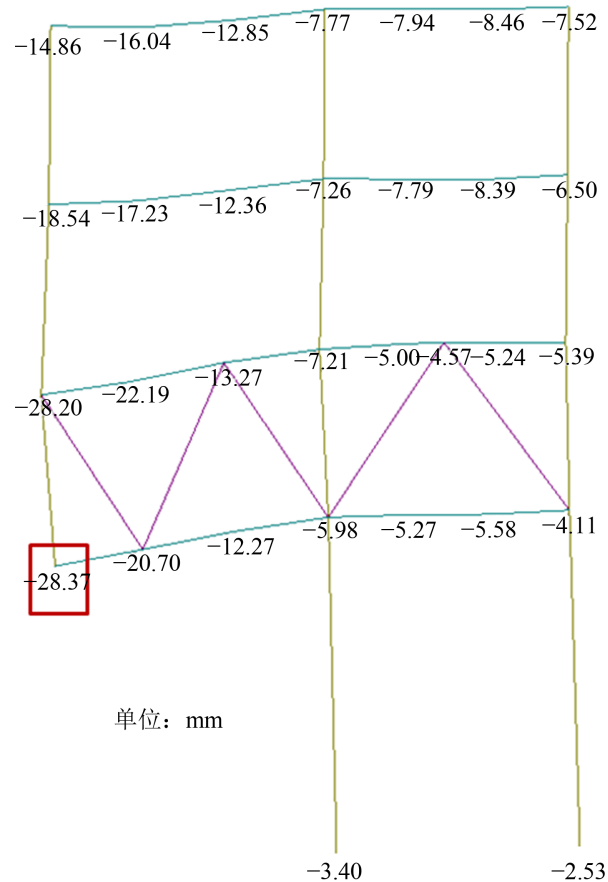


Figure 4. Deflection of cantilever truss (unit: mm)
图 4. 悬挑桁架挠度(单位: mm)

2.2. 悬挑转换桁架的抗震性能分析

本项目三层悬挑结构转换, 悬挑结构的悬挑梁、支撑以及与之相邻的主体结构的钢框柱抗震等级提高至一级采用, 并采取性能设计分析。根据《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3-2010 [3]中 10.6.4 条及 3.11.3 条中所提出: 在预估的罕遇地震作用下, 悬挑结构的钢框柱、桁架正截面不屈服, 其正截面承载力应符合下式(1)的规定; 其受剪承载力应符合下式(2)的规定, 保证斜截面弹性状态。

$$S_{GE} + 0.4S_{EHK}^* + S_{EVK}^* \leq R_K \quad (1) [3]$$

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{EH} S_{EHK}^* + \gamma_{EV} S_{EVK}^* \leq \frac{R_d}{\gamma_{RE}} \quad (2) [3]$$

在罕遇地震作用计算下, 水平地震力和竖向地震力同时考虑, 风荷载不参与地震组合, 地震作用标准值的构件内力计算中不需要再乘以与抗震等级有关的增大系数。计算中可适当考虑阻尼比增加, 增加至 0.05, 周期不考虑折减。为保证转换桁架的承载力有较大的富裕, 桁架相关区域的关键构件截面按照罕遇地震作用工况下的构件应力比小于 0.85 的原则来确定。图 5 为悬挑转换关键构件大震组合应力比云图。表 1 为关键构件的大震下的计算结果, 表中 A 轴~B 轴处的下弦杆即为悬挑转换箱形梁, 壁厚加厚至 40 mm, 应力比为 0.56; 矩形钢管混凝土柱壁厚加厚至 50 mm, 1 到 3 层的应力比最大值为 0.56; B 轴~C 轴处的箱形斜杆因吸收的水平地震力较大, 相比 A 轴~B 轴处的斜杆壁厚加厚 10 mm 至 40 mm 后应力比为 0.61, 满足大震下桁架正截面不屈服, 斜截面弹性的性能目标。

Table 1. Major seismic checking calculation of key components of overhang transfer truss
表 1. 悬挑转换桁架关键构件大震验算

构件位置	构件类型	构件截面	应力比	钢材牌号
悬挑根部竖向构件	钢框柱 GKZ	矩形钢管混凝土柱 □1100x1000x50x50	0.56	
B 轴处耗能构件	钢框梁 GKL	H1000x500x20x30	0.83	
悬挑桁架(A 轴~B 轴)	上弦杆 SXG	H900x400x20x30	0.67	Q355B (性能参数 同 Q345)
	下弦杆 XXG	□1000x600x40x40	0.56	
	斜杆 XG	□500x400x30x30	0.57	
桁架(B 轴~C 轴)	上弦杆 SXG	H900x500x20x30	0.63	
	下弦杆 XXG	H1000x400x20x30	0.38	
	斜杆 XG	□500x400x40x40	0.61	

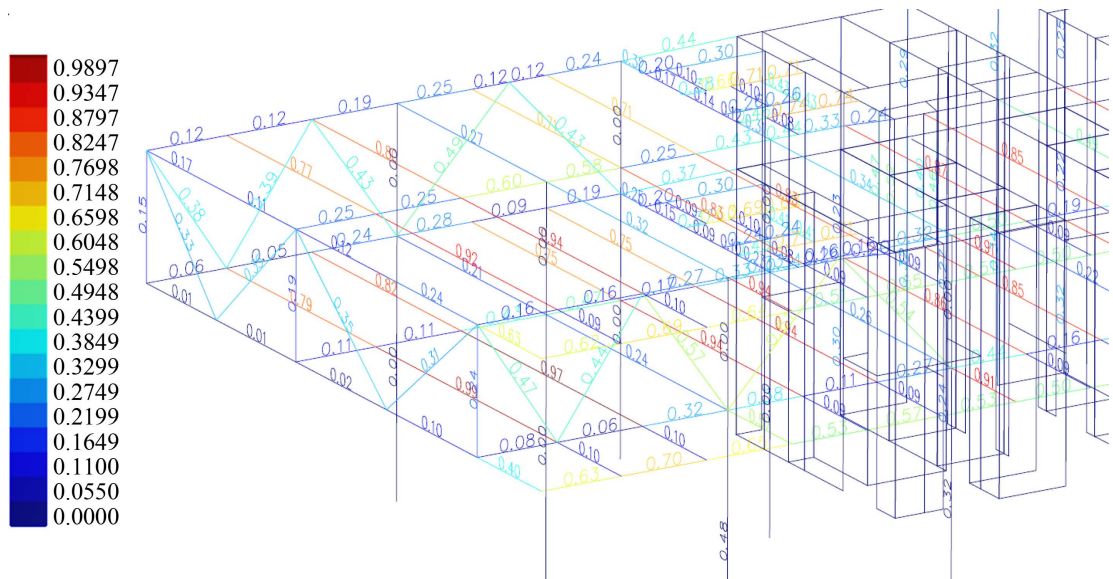


Figure 5. Combined stress ratio of key components of overhang transition
图 5. 悬挑转换关键构件大震组合应力比

2.3. 楼盖舒适度验算

本项目 3 层存在长悬挑部位, 根据《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3-2010 [3]中 10.6.4 条, 悬挑结构上下层楼板承受较大的面内作用, 应考虑楼板平面内的变形。楼板采用的是钢筋桁架楼层板, 桁架下层板厚为 150 mm (已加厚处理), 上层板厚为 130 mm。

悬挑转换桁架相关楼盖区域为办公使用类别, 楼盖第一阶自振频率 f 不宜低于 4 Hz, 在动荷载单独作用下, 楼盖采用钢 - 混凝土组合楼盖时, 混凝土的弹性模量可取静荷载作用时的 1.35 倍, 阻尼比取 0.04, 有效均布活荷载取值为 0.5 KN/m^2 [4]。从表 2 计算结果可以看出桁架上下层的第一自振频率分别为 5.49 Hz、4.41 Hz, 均大于 4 Hz, 满足计算要求。

考虑到该项目属于超限高层, 在满足自振频率限值的情况下, 对模态位移最大点进行竖向振动加速

度分析。办公区域的竖向振动峰值加速度 a 不应大于 0.05 m/s^2 ，采用行走激励荷载来模拟，设计采用的荷载组合为恒载标准值和有效均布活荷载，第一阶的荷载频率取 2.2 Hz ，荷载函数时程总长为 15 s ，人行荷载按集中荷载施加在楼盖第一阶竖向振动模态位移最大点，得出有限元计算的不利振动点处的竖向振动峰值加速度按 0.5 系数的折减得到各不利振动点的竖向振动峰值加速度详见图 6，计算过程中通过加厚不利区域的板厚和加强不利区域的悬挑梁的刚度使得竖向振动加速度满足限值 0.05 m/s^2 的要求。

Table 2. The result of the comfort checking calculation of the related area of the overhang transfer truss
表 2. 悬挑转换桁架相关区域舒适度验算结果

构件位置	楼层	楼板厚度(mm)	一阶自振频率(Hz)	竖向振动加速度(m/s^2)
悬挑转换桁架 相关区域	3层(下弦所在楼层面)	150	$5.49 > [f_0]$	$0.034 < [a_{\text{lim}}]$
	4层(上弦所在楼层面)	130	$4.41 > [f_0]$	$0.028 < [a_{\text{lim}}]$

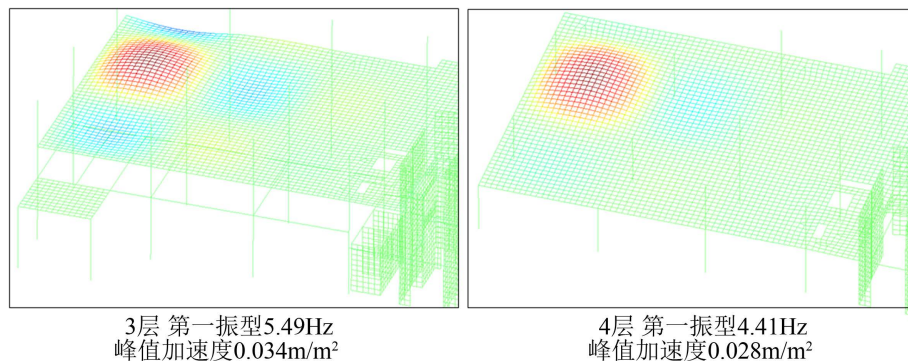


Figure 6. The result of the comfort checking calculation of the related area of the overhang transfer truss

图 6. 悬挑转换桁架相关区域舒适度验算结果

2.4. 楼板应力分析

悬挑转换结构上下层楼板承受较大的面内作用，结构内力计算时，悬挑部位的楼层应考虑楼板平面内的变形[3]。对楼板进行小震和中震下的应力分析。从楼板的应力云图(图 7)可知，在小震作用下，楼板的最大拉应力为 1.9 N/mm^2 小于楼板的轴心抗拉强度标准值 f_{tk} (2.01 N/mm^2)，满足小震作用下楼板不开裂的目标。

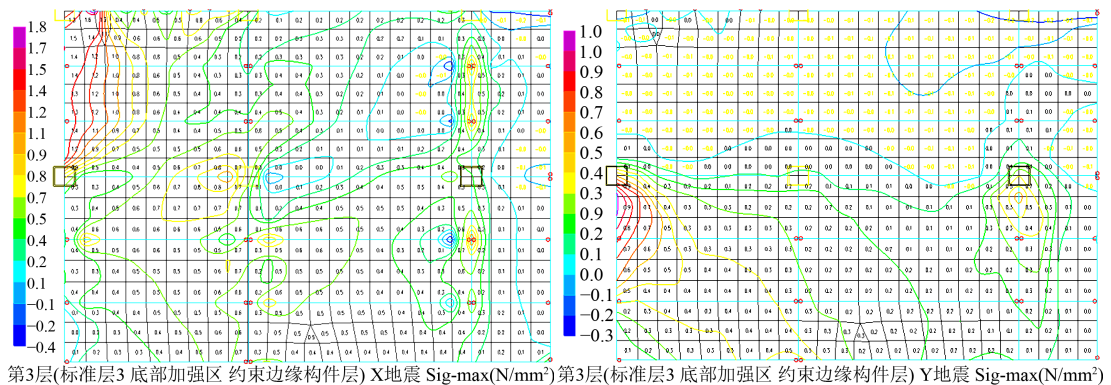
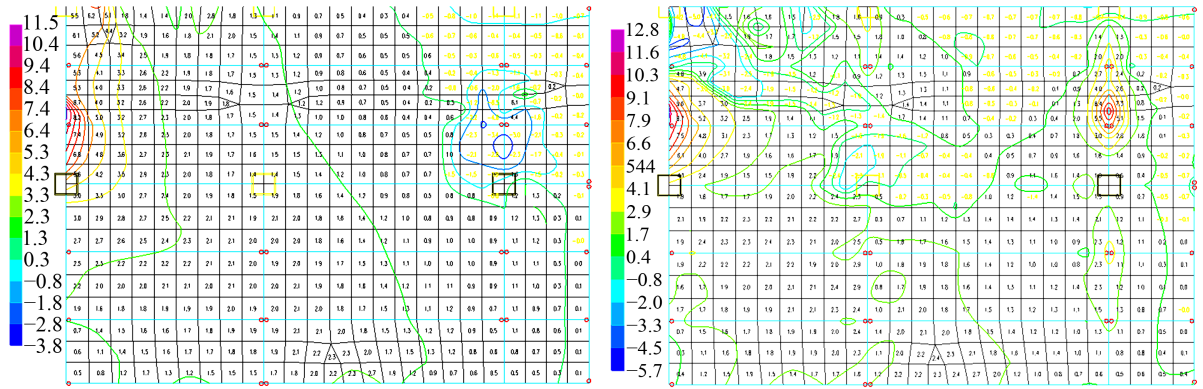


Figure 7. Analysis of floor stress under small earthquakes

图 7. 小震作用下楼板应力分析

在中震作用下，考虑楼板开裂，最大主拉应力由板内的受力钢筋来承担，钢筋应力不超过屈服强度标准值，钢筋材料等级为 HRB400。通过有限元计算结果，加强楼板钢筋，钢筋配置为楼板双层双向通长筋 $\text{Ø}16@100$ ，加强楼板厚度为 150 mm，折算成楼板的水平拉应力限值为 10.7 N/mm^2 。从楼板的应力云图(图 8)可知，在中震作用下，除去应力集中外，楼板的最大应力为 9.6 N/mm^2 ，基本满足计算要求。



第3层(标准层3 底部加强区 约束边缘构建层) X地震 Sig-max(N/mm²) 第3层(标准层3 底部加强区 约束边缘构建层) Y地震 Sig-max(N/mm²)

Figure 8. Stress analysis of floor under medium earthquake
图 8. 中震作用下楼板应力分析

2.5. 节点有限元分析

采用三维实体元节点精细分析软件(YJK-SolidFea)对转换桁架的关键节点进行有限元分析，验算大震下的不屈服性能目标。本项目通过整体模型中选择节点区关联构件形成的节点实体模型，指定上弦杆节点(HJ1 节点)和下弦杆节点(HJ2 节点)作为具体分析目标，具体位置详见图 9。构件钢材强度等级均为 Q355B，材料强度屈服值为 335 MPa ($t \leq 40\text{mm}$)。在建模过程中，对斜腹杆采用倒圆角设计，在节点连接区域增加了连接板、加劲板等细部构造，进行四面体单元网格划分计算得到大震下的应力结果如图 10 所示，根据 Y-SolidFea 分析的应力云图结果可知，HJ1 节点在最不利工况下的应力最大值为 279 MPa ，HJ2 节点在最不利工况下的应力最大值为 322 MPa ，均小于规范屈服强度值，满足大震不屈服性能目标。

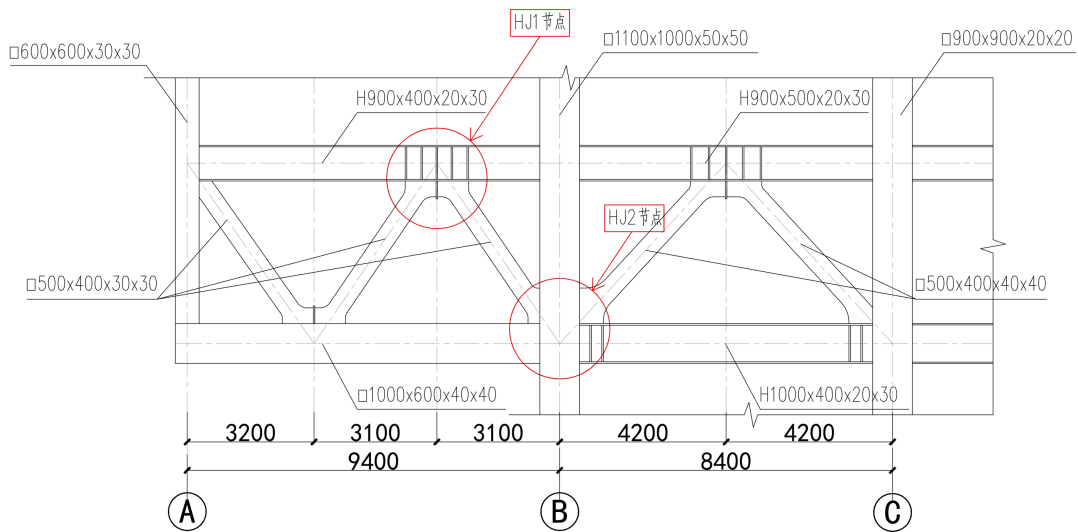


Figure 9. Typical node location diagram
图 9. 典型节点位置示意图

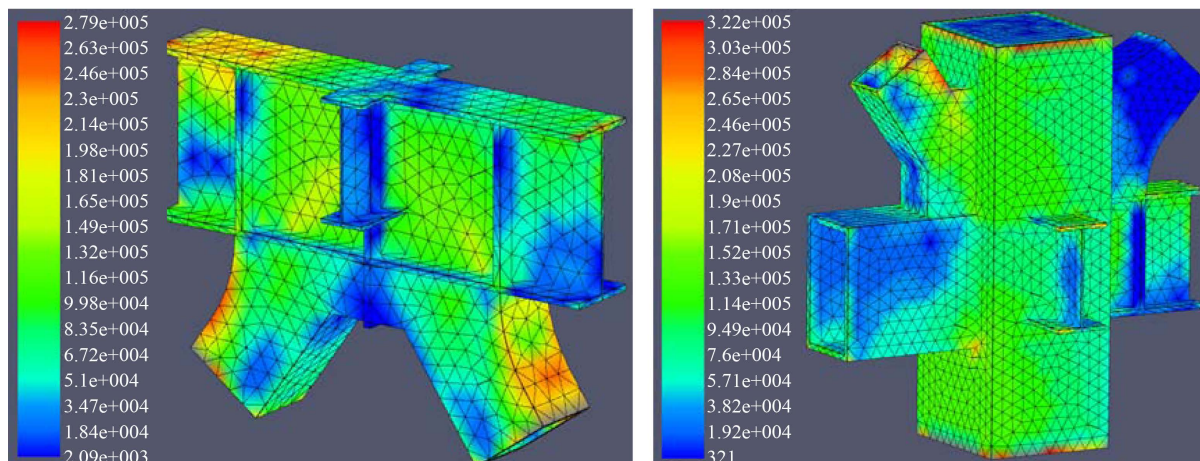


Figure 10. Typical node stress nephogram

图 10. 典型节点应力云图

3. 结论

本项目为悬挑转换桁架结构的复杂超限高层商办楼，本文主要针对该项目的悬挑转换桁架结构作详细的分析计算、性能化设计，达到预期的性能目标。在高层建筑的复杂部位，进行了单榀桁架的分析计算、转换桁架相关区域的楼盖舒适度验算、楼板的应力分析、桁架关键节点的有限元分析等多个分析计算，通过分析计算结构采用对应的加强措施对薄弱部位进行加强处理，以确保整个结构满足抗震性能目标，从而保证整个结构体系的安全与可靠，为类似的工程项目提供参考。

参考文献

- [1] 文智斌. 带悬挑转换层结构设计及性能分析[J]. 中华建设, 2013(10): 96-97.
- [2] 张启文. 钢结构设计标准: GB50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 徐培福. 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.
- [4] 娄宇. 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准: JGJ/T441-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.