

文章编号:1004-2954(2026)05-0180-08

基于多尺度模拟的铁路客站异形分叉柱稳定性分析

孙建龙^{1,2}, 蔡玉军^{1,2}, 段熙宾^{1,2}, 马小平^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 西安 710043;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司建筑与规划设计研究院, 西安 710043)

摘要:【目的】Y形分叉柱作为一种树状承重构件,越来越多地在大跨度铁路客站结构得到应用,保证其平面外稳定对结构整体安全尤为重要。既有分叉柱稳定性研究多以结构整体或局部构件分析为主,前者难以考虑构件的局部力学特征与复杂截面信息,后者难以有效模拟荷载传递及整体刚度影响,因而造成分析结果不准确等问题。【方法】基于此,针对大跨度铁路客站异形变截面分叉柱,基于Rhino Grasshopper构建4种变截面形式的分叉柱,共计12根。应用MIDAS Gen和MIDAS FEA软件建立带异形分叉柱的站房多尺度有限元模型,进而对分叉柱稳定性进行分析。【结果】研究表明,站房1阶模态Z向转动的振型方向因子为21.50%,平面布置不规则所引起的扭转耦联效应显著,应在结构设计时着重考虑偏心所致不利影响;大跨度屋架结构与钢管柱变形协调较好,整体结构传力机制明确,所构建的多尺度结构模型计算合理;分叉柱线性屈曲特征值为19.88,竖向极限承载力51 220.62 kN,考虑初始缺陷影响后,最不利分叉柱极限稳定承载力下降33.5%;考虑几何非线性后,最不利分叉柱极限稳定承载力下降22.48%,但仍具备足够安全储备,表明分叉柱设计结果满足规范要求,设计方法合理。【结论】研究成果对复杂大跨度结构特殊构件的计算有指导意义。

关键词:铁路客站;分叉柱;变截面;稳定性;多尺度模拟**中图分类号:**U291.6 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202408200004

Stability Analysis of Special-Shaped Forked Columns in Railway Passenger Stations Based on Multi-Scale Simulation

SUN Jianlong^{1,2}, CAI Yujun^{1,2}, DUAN Xibin^{1,2}, MA Xiaoping^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Maintenance for Extreme Geotechnical and Tunnel Engineering, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 2. Research Institute of Architectural and Planning Design, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: [Objective] Y-shaped forked columns, as a kind of tree-like load-bearing component, are increasingly applied in large-span railway passenger station structures. Ensuring their out-of-plane stability is particularly important for the overall structural safety. Existing research on the stability of forked columns mainly focuses on either the global structural model or local component analysis. The former fails to adequately consider the local mechanical characteristics and complex cross-sectional information of the components, whereas the latter cannot effectively simulate load transfer and the influence of global stiffness, which may lead to problems such as inaccurate analysis results. [Methods] Judging from the previous drawbacks, based on Rhino Grasshopper, for the special-shaped and variable cross-section forked columns in long-span railway passenger stations, a total of twelve forked columns with

four variable cross-section forms were constructed. MIDAS Gen and MIDAS FEA were used to establish a multi-scale finite element model of the station building with special-shaped forked columns, and the stability performance of the forked columns was then analyzed. [Results] The results showed that the mode direction factor

收稿日期:2024-08-20; **修回日期:**2024-10-11; **网络首发日期:**2025-03-10**基金项目:**中铁第一勘察设计院集团有限公司科研开发项目(2023-B-009, 2022KY54ZD(ZNXT)-05);中国施工企业管理协会青年创新项目(2023-B-009);中国铁路西安局集团有限公司科学技术研究开发计划项目(Y2023034)**作者简介:**孙建龙(1970—),男,正高级工程师,1995年毕业于西南交通大学工业与民用建筑工程专业,工学学士,主要从事站房结构设计工作, E-mail:543068943@qq.com。

of Z-rotation in the first mode of the station building was 21.50%, indicating that the torsional coupling effect caused by the irregular plane layout was significant, and the adverse effects induced by eccentricity should be carefully considered in structural design. The large-span roof truss structure and steel pipe columns exhibited good deformation compatibility, and the load transfer mechanism of the whole structure was clear, indicating that the established multi-scale structure model was reasonable. The linear buckling eigenvalue of the forked column was 19.88, and the vertical ultimate bearing capacity was 51 220.62 kN. After considering the influence of initial defects, the ultimate stability bearing capacity of the most unfavorable forked column decreased by 33.5%. After considering geometric nonlinearity, the ultimate stability bearing capacity of the most unfavorable forked column decreased by 22.48%, but it still featured enough safety reserves, which demonstrated that the design of the forked columns met the specification requirements and the design method was reasonable. [**Conclusion**] The research findings provide guidance for the calculation of special components in complex long-span structures.

Key words: railway passenger station; forked column; variable cross-section; stability; multi-scale simulation

引言

随着铁路客站建设水平的快速发展,人们对于大型交通枢纽结构性能与建筑形体的综合要求越发提高。Y形柱作为一种竖向承重和抗侧力构件,在保证结构整体承载能力的前提下,能够更好地满足复杂建筑构型要求,因而被广泛应用于大跨度铁路站房、机场航站楼设计建造中^[1-3]。

Y形分叉柱是竖向柱通过一级分枝找形后,形成的一种基本树状构件^[4-6]。其形态相似于自然界中的树,通过树枝逐级向下传递,将屋面荷载有效集中至基础,为上部结构提供较大的支撑空间^[7-8]。分叉柱的力学性能与分枝杆件的长度及其与水平面夹角等密切相关。同时,其平面外抗侧刚度相比平面内明显较弱,故确保Y形分叉柱具备足够的稳定承载力显得尤为关键。

近些年,众学者在Y形柱结构性能分析方面开展了较多研究。张耀康等^[9]针对浦东国际机场T2航站楼主楼的Y形柱,考虑材料和几何非线性影响,分析水平地震作用下Y形柱的稳定性能。闫晓鸣等^[10]针对包头站站台雨棚分叉式钢管混凝土柱,研究指出分叉柱支撑角在35°~50°变化时,结构整体受力状态最优且最经济、合理。扈鹏等^[11]针对西安咸阳国际机场Y形柱,从建筑选型到结构受力进行系统分析。该柱采用八边形实腹式截面,通过静、动力分析指出,该柱的竖向、侧向刚度和承载力均满足设计要求。陶连金等^[12]研究分析大跨度Y形柱地铁车站结构的抗震性能,指出分叉点部位应变显著突变,应进行设计构造加强。

上述研究从结构整体层面或局部构件层面对分叉

柱的力学性能进行了深入研究分析,相关成果为同类型结构的设计分析提供了有力支撑。在整体分析方面,通过将分叉柱与其他结构构件整体考虑,可清晰计算分叉柱对结构整体性能的影响。虽然此方法可实现楼屋面荷载的真实布置与传递,但对于分叉柱这类复杂的局部构件,难以精细化模拟其局部力学特征或响应。同时,对于有建筑形体要求的异形变截面分叉柱,其横断面可能随高度不断变化,整体分析方法中的杆系模型难以准确定义构件截面信息,而采用等代方法近似定义的构件几何尺寸,易造成结果失真。在局部构件分析方面,部分学者通过精细化有限元建模,构建分叉柱实体模型,通过在柱顶施加相应荷载及边界条件,对构件力学特征进行准确模拟。然而,此方法虽然操作简单,但对于整体刚度对局部精细化构件模型的贡献考虑不足,同时荷载传递路径与实际状况不符,分析结果准确性难以保证。因此,整体或局部分分析方法均难满足复杂大跨结构特殊构件的计算需求(图1)。

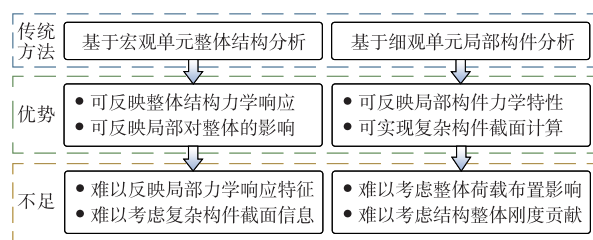


图1 传统模拟方法的优势与不足

Fig. 1 Advantages and disadvantages of traditional simulation methods

多尺度模拟作为整体简化模型和局部精细化模型的一种折中形式,以宏观单元模拟结构整体,以微观单元模拟局部重点构件,准确计算结构整体响应及构件局

部细节特性,同时兼顾复杂部位的精确表征^[13-14]。多尺度有限元建模方法主要包括子模型法^[15]、界面位移协调法^[16]、子结构法^[17]。其中,界面位移协调法应用较为普遍。该方法是通过约束方程或约束单元对宏观单元与细观单元进行连接,以整体模型切割位置节点的自由度为标准值,令局部模型边界节点自由度与其相等,从而实现不同类型单元间的耦合^[18-20]。魏建鹏等^[21]基于位移一致性原理,建立单层空间网格结构多尺度有限元模型,并完成模型抗连续倒塌分析。石永久等^[22]建立用于抗震性能分析的四层钢框架梁-壳单元混合多尺度模型,并建立连接截面与节点之间转动及梁横向位移协调,验证模型的准确性。WANG 等^[23]实现纤维梁单元与实体单元的耦合,建立混合框架结构多尺度模型,分析钢梁与钢管混凝土柱连接处的连续倒塌性能。上述研究表明,基于既有有限元分析软件容易实现宏观单元(如梁单元)与细观单元(如壳单元)的界面耦合,进而建立多尺度有限元分析模型。

鉴于此,本文针对大跨度铁路客站异形变截面分叉柱,基于 Rhino Grasshopper 构建 4 种截面形式的分叉柱,共计 12 根。进而应用 MIDAS Gen 和 MIDAS FEA 软件建立带异性分叉柱的站房多尺度有限元模型,并对分叉柱稳定性能进行研究分析。

1 工程概况

1.1 项目概况

滁州站(图 2)位于滁州市南侧,车场总规模 4 台 10 线。新建站房由侧式站房和高架站房组成,建筑面积 $3.98 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。站台雨棚面积 $1.48 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。站房工程主要包括出站层(高程 -10.200 m)、站台层(高程 -3.500 m)、站台夹层(高程 3.500 m)、高架候车层(高程 9.900 m)和旅服夹层(高程 17.400 m)。结构最高点高程 43.1 m。



图 2 滁州站鸟瞰及剖面

Fig. 2 Aerial view and section of Chuzhou Station

1.2 设计参数

站房屋盖采用正交空间管桁架体系(图 3)。

横向主桁架沿站房顺轨向布置,其中高架站房区域主桁架分三跨连续布置,中间跨跨度为 62.4 m,两侧 36.1 m,外挑 10 m。侧式站房区域中部单跨布置 62.4 m 倒三角空间桁架(两翼区域顺轨向布置次桁架,跨度 $4 \times 13.8 \text{ m} + 17.8 \text{ m}$)。纵向主桁架沿站房垂轨向布置,高架站房区域为多跨连续桁架,最大跨度 23.5 m。侧式站房区域两翼布置平面主桁架,跨度为 42 m,外挑 10~15 m。纵、横向桁架与框架柱一起构成纵横主框架,为屋盖主要承重结构。次桁架垂直于各主桁架间,连接两榀主桁架,为横向主桁架提供侧向支撑。

综合考虑站房钢屋盖结构形式与下部支座条件,该层框架柱采用钢管柱。钢管柱柱顶与屋顶主桁架刚接,底部与下部结构刚接。高架候车大厅部分沿站房横向(顺轨向)布置 4 列钢柱,柱距为 $36 \text{ m} + 62.4 \text{ m} + 36 \text{ m}$,中部两列采用 Y 形分叉柱,两侧边柱采用普通

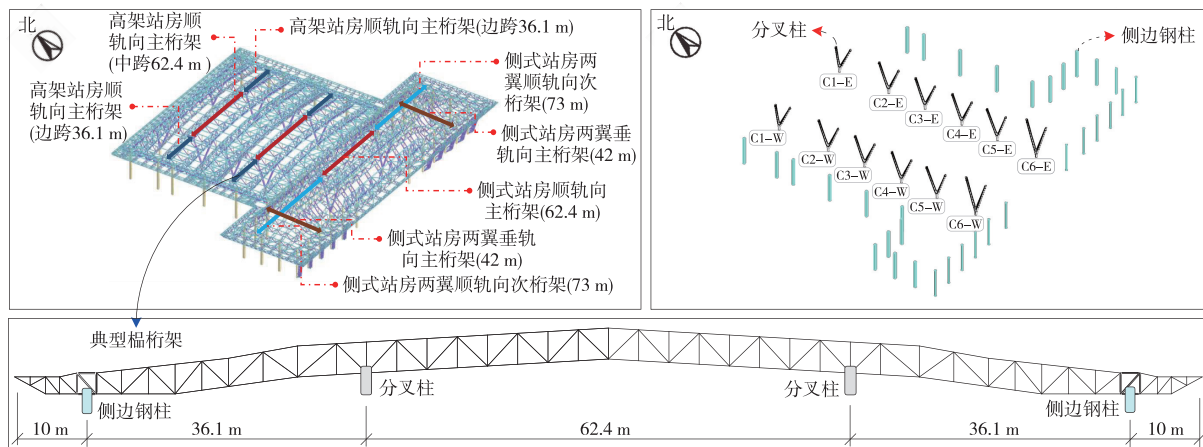


图 3 滁州站结构组成

Fig. 3 Structural composition of Chuzhou Station

钢管柱。为满足室内建筑效果,候车大厅中部的12根分叉柱采用异形变截面Y形柱,沿柱全高分别采用4种不同的截面,如图4所示。依照GB50009—

2012《建筑结构荷载规范》^[24],站房屋架恒荷载取 0.8 kN/m^2 ,活荷载取 0.58 kN/m^2 ,风荷载 0.5 kN/m^2 ,节点自重系数沿Z向取1.25。

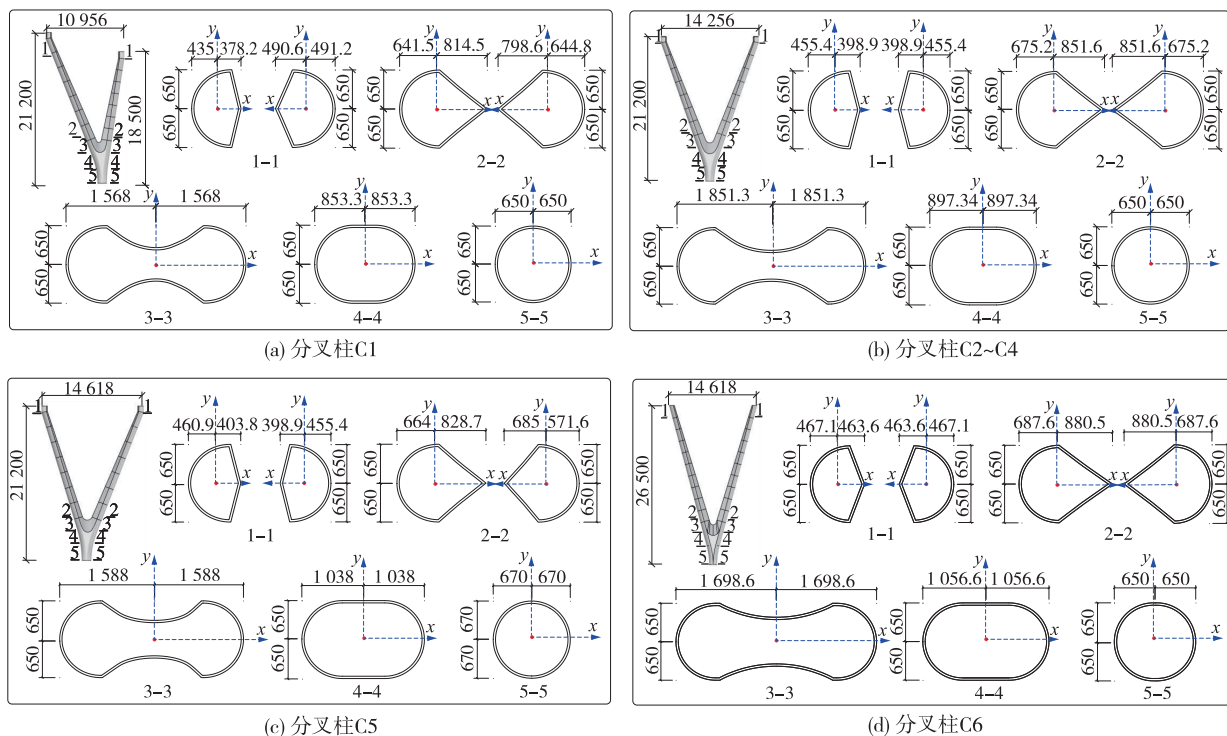


图4 站房分叉柱布置及截面(单位:mm)

Fig. 4 Forked column layout and cross-section of station building (unit: mm)

2 稳定性分析

2.1 多尺度模拟流程

本文涉及的4种异形变截面分叉柱难以通过传统宏观杆件模拟方法定义其截面。为准确描述异形柱力学变化特征,并且反映结构整体响应,对站房整体及各分叉柱进行多尺度建模分析。

采用有限元分析软件MIDAS Gen和MIDAS FEA NX联合实现站房的多尺度模拟,具体模拟流程如图5所示。首先,以常用钢结构设计软件3D3S为基础,导出分析所需的分叉柱宏观模型和不包含分叉柱的整体宏观模型。其中,整体模型包含材料属性、杆件截面、边界条件、荷载信息等。然后,将分叉柱宏观模型导入建模软件Rhino中,通过Grasshopper参数化建模,完成异形变截面分叉柱几何模型的创建。其次,导出分叉柱模型dxf文件,导入MIDAS FEA软件中,通过生成曲面、布尔运算、2D网格划分等,生成分叉柱精细化有限元模型。最后,导出分叉柱有限元模型的mgt文件,并导入MIDAS Gen中生成mgb文件,通过合并数据文件的方式,组装整体宏观模型与分叉柱有限元模型。利用刚接连方式,耦合分叉柱顶处宏观杆件节点与精细化模型节点的平动自由度,实现多尺

度模型的创建。



图5 多尺度模拟流程

Fig. 5 Multi-scale simulation process

2.2 多尺度模型建立

依据上述建模流程,完成该站房主体结构多尺度模型的创建,如图6所示。为避免分叉柱上部杆件局部屈曲,在其内部设置间距为2m的截面加劲肋。采用MIDAS FEA中内嵌的2D德劳内网格进行单元划分,单元类型为三角形+四边形,网格尺寸为200~500mm,12个分叉柱共计61440个单元。柱顶壳单元节点与梁单元节点采用刚性连接的方式,以弦杆交点为主节点,以柱顶所有壳单元节点为从节点,通过约束方程关联二者平动与转动自由度。

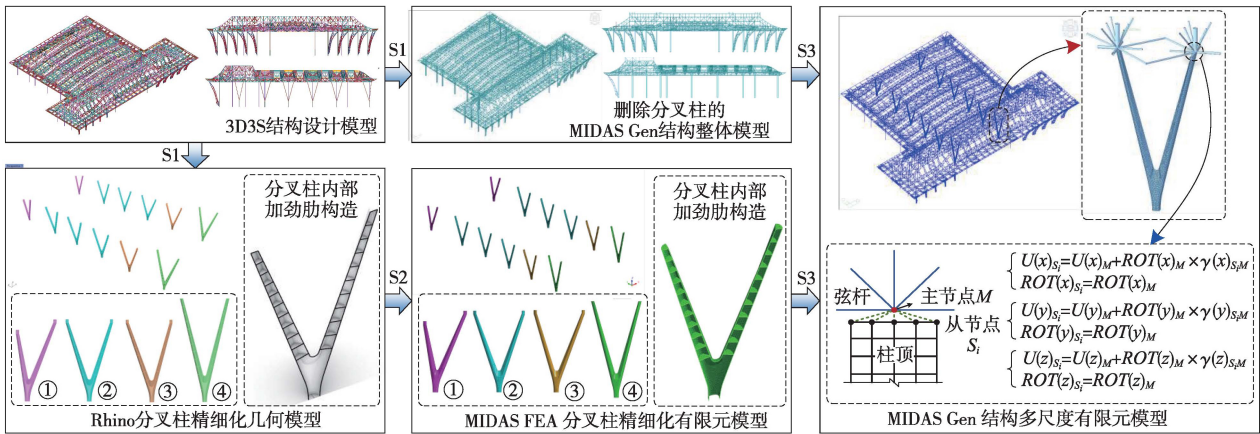


图 6 带异形分叉柱站房的多尺度结构模型构建流程

Fig. 6 Construction process of multi-scale structure model for station building with special-shaped forked columns

2.3 材料参数及本构模型

本项目钢材均采用 Q355B, 依据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[25], 钢材本构采用两折线模型。设计强度 f 为 295 MPa, 抗拉强度 f_u 为 470 MPa, 弹性模量 E 为 2.06×10^5 MPa, 强化率 α 为 1.0%^[26-27]。所有分叉柱在分叉点以下采用铸钢节点, 铸钢件牌号 G20Mn5N。依据 JGJ/T 395—2017《铸钢结构设计规范》^[28] 和 CECS 235—2008《铸钢节点应用技术规程》^[29], 采用两折线模型, 设计强度 f 取 230 MPa, 抗拉强度 f_u 取 480 MPa, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa, 强化率 α 为 1.0%^[28-29]。

2.4 模态分析结果

站房特征值分析采用 Lanczos 方法, 模态分析结果如图 7 所示。前 15 阶自振频率及周期如表 1 所示。1 阶模态 X 向平动的振型方向因子为 78.09%, Z 向转动的振型方向因子为 21.50%, 以平动为主。2 阶模态 X 向平动的振型质量参与占比为 41.44%, Z 向转动的振型质量参与占比为 57.95%, 扭转明显。3 阶模态 X 向平动的振型质量参与占比为 36.42%, Z 向转动的振

型质量参与占比为 61.18%, 扭转效应更加显著。结果表明, 跨度较大的站房结构, 平面布置的不规则性, 使得平动扭转耦联效应显著, 结构设计时应着重考虑质心与刚心偏心所带来的不利影响。

表 1 结构自振频率及周期

Tab. 1 Natural vibration frequencies and periods of structure

模态阶数	频率/Hz	周期/s
1	1.038 5	0.962 9
2	1.184 3	0.844 4
3	1.303 5	0.767 1
4	1.354 2	0.738 4
5	1.396 9	0.715 9
6	1.656 9	0.603 6
7	1.685 9	0.593 1
8	1.871 0	0.534 5
9	2.100 9	0.476 0
10	2.309 9	0.432 9
11	2.350 7	0.425 4
12	2.659 1	0.376 1
13	2.936 7	0.340 5
14	3.076 9	0.325 0
15	3.169 4	0.315 5

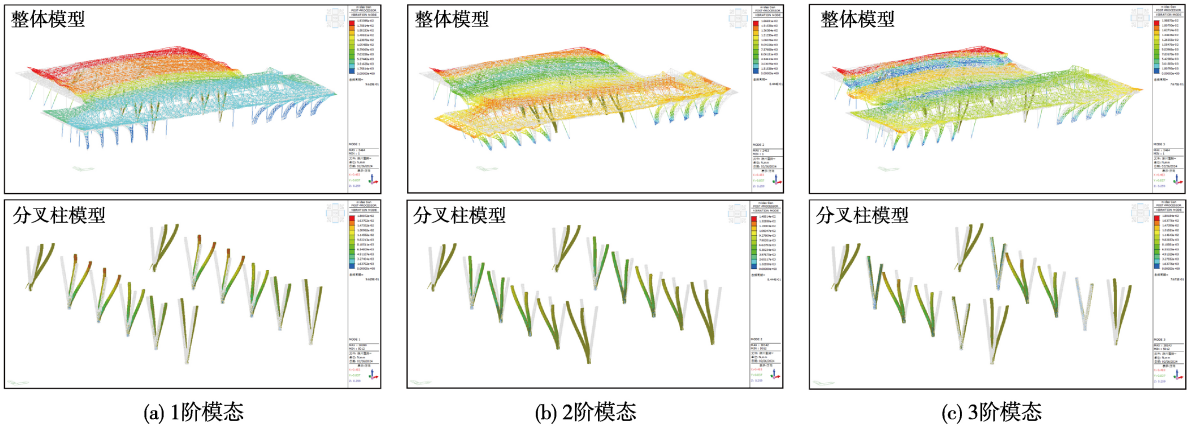


图 7 模态计算结果

Fig. 7 Modal analysis results

2.5 静力分析结果

取 1.0 倍恒、活荷载组合下结构静力结果进行分析,如图 8 所示。变形最大点屋架北侧跨中位置,最大位移 110 mm。分叉柱 C6 的柱顶位移最大,为 7.11 mm。屋架结构与钢管柱变形协调,整体结构传力机制明确,表明所构建的多尺度结构模型计算合理。

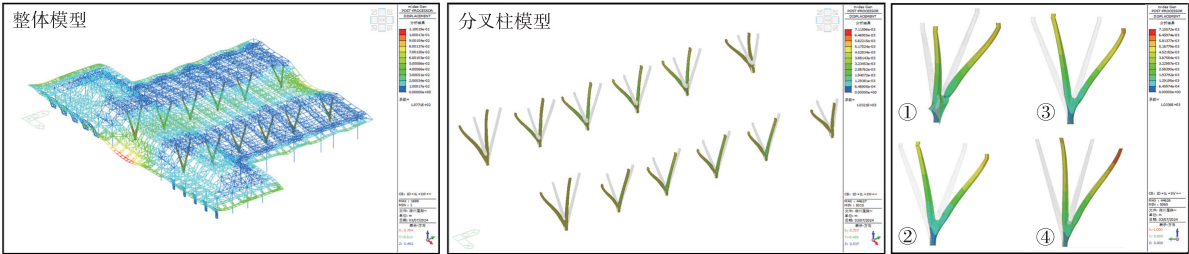


图 8 静力计算结果
Fig. 8 Static analysis result

表 2 分叉柱顶节点内力
Tab. 2 Internal forces at top joints of forked columns

编号	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$
C1-E1	-397.34	-95.82	1 437.97	88.50	1 080.93	-147.02
C1-E2	-1 014.09	-424.95	2 163.29	30.68	572.76	-84.14
C1-W1	457.10	-90.21	1 394.14	85.67	-1 076.90	142.05
C1-W2	963.08	-453.31	2 197.88	0.66	-561.00	77.27
C2-E1	-1 364.63	267.39	2 121.46	211.48	414.99	-47.87
C2-E2	-1 006.22	11.44	1 595.53	-0.77	76.81	-93.73
C2-W1	1 366.85	292.76	2 195.14	225.39	-444.00	62.47
C2-W2	1 007.21	5.10	1 692.49	2.52	50.07	111.80
C3-E1	-467.18	75.12	1 807.24	9.12	-185.24	-7.09
C3-E2	-645.20	7.79	1 909.32	-76.61	-147.03	-12.08
C3-W1	475.10	75.26	1 799.44	12.85	227.80	4.56
C3-W2	638.52	-2.54	1 941.65	-80.46	165.17	7.12
C4-E1	-679.94	115.02	1 587.26	14.01	2.21	32.02
C4-E2	-820.96	91.36	1 516.40	-33.56	136.45	-9.32
C4-W1	683.74	110.03	1 609.25	19.72	-58.74	-31.74
C4-W2	831.65	84.99	1 476.27	-11.06	-192.14	6.91
C5-E1	-1 219.83	-189.53	1 534.88	-131.41	97.94	98.23
C5-E2	-1 593.05	-596.56	2 803.92	-426.30	181.57	53.04
C5-W1	1 324.54	-183.56	1 493.67	-104.43	26.27	-70.88
C5-W2	1 479.48	-460.44	2 420.18	-332.35	44.74	-32.51
C6-E1	-1 116.58	663.42	2 576.46	12.61	640.05	35.63
C6-E2	122.92	733.10	1 822.29	-237.81	960.75	76.54
C6-W1	819.66	432.58	2 489.15	-91.78	-200.18	-49.01
C6-W2	86.01	684.72	2 065.53	-223.61	-796.00	-78.66

注:E 代表东侧;W 代表西侧。

2.6 线性稳定分析结果

依据表 2 的计算结果,以 1.0 倍恒、活荷载下的分叉柱顶节点内力作为两种荷载工况,施加至柱顶主节点上,并删除屋面其他荷载。线性屈曲分析选择恒载、活载两种工况的线性组合,组合系数均为 1,模态数量为 15,则站房结构多尺度模型的线性屈曲分析结果如图 9 所示。计算所得前三阶屈曲特征值分别为

为更进一步地研究分叉柱稳定性,分别提取恒、活荷载下分叉柱顶的节点内力。荷载组合下四类分叉柱柱顶节点内力如表 2 所示。可以看出,分叉柱两分肢所承受的荷载存在明显不对称性,这对异形柱整体稳定造成了不利影响,应对荷载作用下分叉柱进行稳定分析,同时考虑整体钢屋架对各柱的刚度贡献。

19.88、22.35、24.96,分叉柱 C6-E1 最先发生平面外失稳,其竖向极限承载力为 51 220.62 kN。

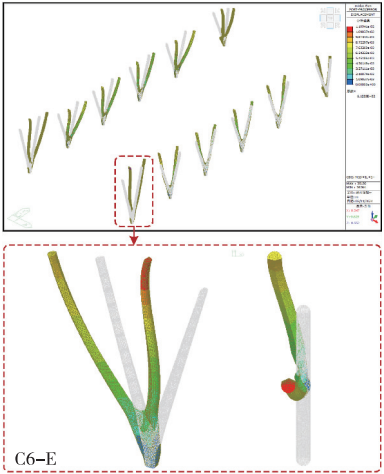


图 9 分叉柱线性屈曲分析结果
Fig. 9 Linear buckling analysis results of forked columns

2.7 考虑初始缺陷的稳定分析结果

为考虑分叉柱初始缺陷的影响,依据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[27],分叉柱初始几何缺陷模式按最低阶整体屈曲模态采用,初始几何缺陷代表值的最大值取柱高的 1/250。以 C6 的高度计算,初始缺陷最大值 26.5 m/250=0.106 m。考虑初始缺陷后,对结构多尺度模型进行分析计算,计算所得前三阶屈曲特征值分别为 13.22、16.74、20.13,分叉柱 C6-E1 最先发生平面外失稳,其竖向极限承载力为 34 061.20 kN,相比不考虑初始缺陷,下降 33.5%。

2.8 考虑初始缺陷的非线性稳定分析结果

为进一步考虑几何及材料非线性对结构稳定性的影响,采用非线性屈曲分析法对带初始缺陷的多尺度模型进行求解计算。首先,定义非线性荷载组合工况

为 1 倍恒载加 1 倍活载,并完成该工况下的结构线弹性分析。然后,选择非线性分析计算方法为位移控制法,以线弹性分析结果中变形最大的节点作为位移控制节点,位移步数量为 100,子步迭代数量为 20,最大控制位移为 500 mm。为对比多尺度模拟与传统杆单元模拟的结果,此处采用等效截面抵抗矩的方法,将异性分叉柱按照图 4 中 5 个剖面分割成 5 段,每段用矩形钢管代替变截面钢管,并保证所采用的矩形与变截面在沿主轴方向的截面抵抗矩近似相等。采用 3D3S 软件对等效后带分叉柱的宏观杆系站房模型进行非线性稳定分析。最后,通过非线性迭代分析,计算得到柱顶位移与荷载系数的关系曲线,如图 10 所示。可以看出,多尺度模型在考虑初始缺陷和几何非线性情况下,荷载系数达到 15.41 时,位移-荷载曲线出现明显屈服,而后随着位移不断增长,荷载增长显著变缓。相比线性分析结果,结构极限荷载下降 22.48%,但仍具备足够的安全储备,表明分叉柱设计方式满足要求。当考虑材料非线性时,分叉柱的屈服系数进一步下降,但屈服后仍具备一定的稳定承载力,直至位移达到 50 mm 时,结果不收敛,程序终止计算。

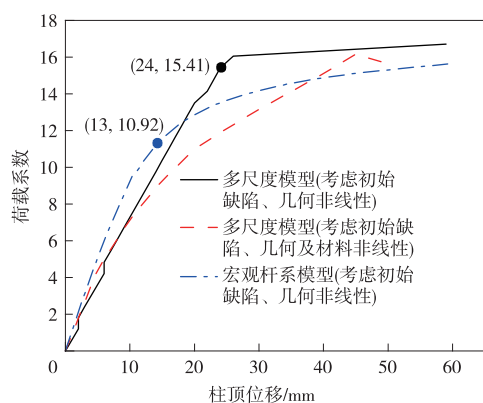


图 10 柱顶位移与荷载系数关系曲线

Fig. 10 Relation curves between column top displacement and load coefficient

作为对照,宏观杆系模型在考虑初始缺陷和几何非线性的情况下,屈曲失稳处的荷载系数相比多尺度模型下降 29.14%,柱顶位移减小 45.84%。同时,宏观杆系模型整体曲线的初始刚度与多尺度模型相比也存在明显差异,这与杆件的截面特性、划分方法及数量等参数密切相关。上述参数是将异性变截面构件等效为常规构件的关键,但在实际计算时往往难以标定,使得等效后计算精度难以保证。因此,今后研究中仍需开展宏观杆系模型等效方法的进一步研究。而针对带异形变截面分叉柱的站房结构,本文所采用的多尺度模拟方法是兼顾计算效率和分析精度的可选方法

之一。

3 结论

针对滁州站异形变截面分叉柱,基于 3D3S 软件得到结构设计模型,通过 Rhino Grasshopper 构建 4 种截面的分叉柱壳模型,进而应用 MIDAS FEA 构建分叉柱有限元模型。最终,在 MIDAS Gen 整合形成含精细化分叉柱模型的多尺度结构有限元模型。通过分析计算,主要得出如下结论。

(1)站房 1 阶模态 Z 向转动的振型方向因子为 21.50%,2 阶为 57.95%,3 阶为 61.18%,扭转效应逐渐增大。结果表明,跨度较大的站房结构体系,平面布置的不规则性,使得平动扭转耦联效应显著,应在结构设计时着重考虑质心与刚心偏心所带来的不利影响。

(2)静力分析结果表明,变形最大点在屋架北侧跨中位置,最大位移 110 mm。分叉柱中 C6 柱顶位移最大,为 7.11 mm。屋架结构与钢管柱变形协调,整体结构传力机制明确,所构建的多尺度结构模型计算合理。

(3)线性稳定分析结果表明,分叉柱 C6-E1 最先发生平面外失稳,屈曲特征值 19.88,竖向极限承载力 51 220.62 kN。考虑初始缺陷影响后,分叉柱稳定承载力下降 33.5%。

(4)考虑几何非线性影响,分叉柱 C6-E1 的极限稳定承载力下降 22.48%,但仍具备足够的安全储备,表明分叉柱设计结果满足规范要求,设计方法合理。

参考文献:

- [1] 钱耀华,刘艺萍,陈瑛,等.某底部设置 V 型分叉柱超限高层建筑结构设计[J].建筑结构,2023,53(S1):87-91.
QIAN Yaohua, LIU Yiping, CHEN Ying, et al. Structural Design of a Transfinite High-rise Building with V-shaped Bifurcated Columns at the Bottom[J]. Building Structure, 2023,53(S1):87-91.
- [2] 李响.某酒店混凝土异形分叉斜柱的分析与设计[J].建筑结构,2022,52(S2):283-286.
LI Xiang. Analysis and Design of the Concrete Irregular Branching Inclined Column of a Hotel[J]. Building Structure, 2022,52(S2):283-286.
- [3] 崔家春,周健,杨联萍,等.Y 形柱稳定性分析研究[J].建筑结构,2012,42(5):115-118.
CUI Jiachun, ZHOU Jian, YANG Lianping, et al. Analysis and Research on Stability of Y-shaped Columns[J]. Building Structure, 2012,42(5):115-118.
- [4] 陈俊,张其林,谢步瀛.树状柱在大跨度空间结构中的研究与应用[J].钢结构,2010,25(3):1-4, 21.
CHEN Jun, ZHANG Qilin, XIE Buping. Research and Application of Dendritic Column in long-span Spatial Structure[J]. Steel Construction, 2010,25(3):1-4,21.
- [5] 武岳,张建亮,曹正罡.树状结构找形分析及工程应用[J].建筑结

- 构学报,2011,32(11):162-168.
- WU Yue, ZHANG Jianliang, CAO Zhenggang. Form-finding Analysis and Engineering Application of Branching Structures[J]. Journal of Building Structures, 2011,32(11):162-168.
- [6] VON BUELOW P, SYNNEK K. A Tree for a House: Designing for Super-mobility[J]. Journal of Architectural Education (1984-), 2004,58(1):45-53.
- [7] 徐超,王正中,刘铨鸿,等. 考虑稳定性的树状结构形态布局优化研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(6):61-68.
- XU Chao, WANG Zhengzhong, LIU Quanhong, et al. Form Optimization of Branching Structures Considering Structural Stability[J]. Journal of Building Structures, 2018,39(6):61-68.
- [8] 徐超,王正中,李宝辉,等. Y型钢管柱整体稳定性有限元分析[J]. 钢结构,2017,32(4):64-68,53.
- XU Chao, WANG Zhengzhong, LI Baohui, et al. Finite Element Analysis on Overall Stability of y-shaped Steel Tubular Column[J]. Steel Construction, 2017,32(4):64-68,53.
- [9] 张耀康,施志深,周健,等. 浦东国际机场T2航站楼主楼钢屋盖Y形柱整体稳定性研究[J]. 建筑结构,2009,39(6):72-76.
- ZHANG Yaokang, SHI Zhishen, ZHOU Jian, et al. Research on Stability of the Y-shape Column in Roof Structure of Shanghai Pudong International Airport T2[J]. Building Structure, 2009,39(6):72-76.
- [10] 闫晓鸣. 包头站站台雨棚结构设计研究[J]. 铁道标准设计,2014,58(4):110-114.
- YAN Xiaoming. Structure Design and Research of Platform Canopy at Baotou Railway Station[J]. Railway Standard Design, 2014,58(4):110-114.
- [11] 扈鹏,曹莉,李贞,等. 西安咸阳国际机场东航站楼钢结构设计[J]. 建筑结构,2022,52(11):8-14,63.
- HU Peng, CAO Li, LI Zhen, et al. Steel Structural Design of East Terminal Building of Xi'an Xianyang International Airport[J]. Building Structure, 2022,52(11):8-14,63.
- [12] 陶连金,刘春晓,边金,等. 大跨度Y形柱地铁站结构地震反应研究[J]. 力学学报,2017,49(1):55-64.
- TAO Lianjin, LIU Chunxiao, BIAN Jin, et al. Seismic Response of Subway Station with Large Span and Yshaped Column[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017,49(1):55-64.
- [13] 方钊,李爱群,李万润,等. 钢结构风致疲劳分析的多尺度有限元验证分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(6):1131-1139.
- FANG Zhao, LI Aiqun, LI Wanrun, et al. Verification on Multi-scale Finite Element of Wind-induced Fatigue of Steel Structures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(6):1131-1139.
- [14] LI J, HAO H. Numerical Study of Structural Progressive Collapse Using Substructure Technique[J]. Engineering Structures, 2013,52:101-113.
- [15] WANG H, LI A Q, HU R M, et al. Accurate Stress Analysis on Steel Box Girder of Long Span Suspension Bridges Based on Multi-scale Submodeling Method[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(4):727-740.
- [16] LIU W K, QIAN D, GONELLA S, et al. Multiscale Methods for Mechanical Science of Complex Materials: Bridging from Quantum to Stochastic Multiresolution Continuum[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010,83(8/9):1039-1080.
- [17] SONG L F, WU M X, WANG J T, et al. Seismic Damage Analysis of the Outlet Piers of Arch Dams Using the Finite Element Sub-model Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016,15(3):617-626.
- [18] 林旭川,陆新征,叶列平. 钢-混凝土混合框架结构多尺度分析及其建模方法[J]. 计算力学学报,2010,27(3):469-475,495.
- LIN Xuchuan, LU Xinzhen, YE Lieping. Multi-scale Finite Element Modeling and Its Application in the Analysis of a Steel-concrete Hybrid Frame[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3):469-475,495.
- [19] 罗尧治,刘海峰,娄荣. 考虑焊接球节点变形的网壳结构多尺度有限元分析方法[J]. 工程力学,2011,28(11):190-196,209.
- LUO Yaozhi, LIU Haifeng, LOU Rong. multi-scale Finite Element Simulation of Reticulated Shell Considering Deformation of Welded Hollow Spherical Joints[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(11):190-196,209.
- [20] HUANG M S, CHENG X H, LEI Y Z. Structural Damage Identification Based on Substructure Method and Improved Whale Optimization Algorithm[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(2):351-380.
- [21] 魏建鹏,田黎敏,郝际平. 单层空间网格结构抗连续倒塌的多尺度有限元模型分析[J]. 建筑结构学报,2019,40(8):127-135.
- WEI Jianpeng, TIAN Limin, HAO Jiping. Multi-scale Finite Element Analysis for Anti-progressive Collapse of Single-layer Spatial Grid Structures[J]. Journal of Building Structures, 2019,40(8):127-135.
- [22] 石永久,王萌,王元清. 基于多尺度模型的钢框架抗震性能分析[J]. 工程力学,2011,28(12):20-26.
- SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Seismic Behavior Analysis of Steel Frame by Multi-scale Calculation Method[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(12):20-26.
- [23] WANG W D, LI H W, WANG J X. Progressive Collapse Analysis of Concrete-filled Steel Tubular Column to Steel Beam Connections Using Multi-scale Model[J]. Structures, 2017,9:123-133.
- [24] 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.
- [25] 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(2018年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [26] 张婉越,陈以一. 钢材模型强化参数对构件滞回性能模拟的影响分析[J]. 建筑钢结构进展,2017,19(1):10-16.
- ZHANG Wanyue, CHEN Yiyi. Effect of the Hardening Parameters in Steel Constitutive Models on the Hysteretic Behavior of Structural Members[J]. Progress in Steel Building Structures, 2017,19(1):10-16.
- [27] GUO L H, JIA M M, LI R, et al. Hysteretic Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls[J]. International Journal of Steel Structures, 2013,13(1):163-174.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 铸钢结构技术规程:JGJ/T 395—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [29] 中国工程建设标准化协会. 铸钢节点应用技术规程:CECS 235—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2008.

(编辑:王婷)