合肥新桥国际机场T2航站楼足尺铸钢节点受力性能研究

邓 强[1],王静峰[2,3,4*],骆 杰[1],刘云飞[1],唐国旺[1],刘 锦[1],郭 磊[2],刘 世[2]
(1.北京城建集团有限责任公司,北京 100088; 2.合肥工业大学 土木与水利工程学院,合肥 230009; 3.合肥工业大学 土木工程结构与材料安徽省重点实验室,合肥 230009; 4.合肥工业大学 先进钢结构协同技术与产业化安徽省协同创新中心,合肥 230009)

摘 要: 合肥新桥国际机场T2航站楼屋盖采用了复杂铸钢节点,针对关键位置处的铸钢节点多杆件交汇而受力复杂的问题,对新桥机场实际工程中服役的铸钢节点进行足尺受力性能试验和有限元分析,来验证此铸钢节点设计的安全性与可靠性。对足尺铸钢节点进行受力性能试验,发现在2.0倍设计荷载作用下节点整体处于线弹性状态,其应变随荷载基本呈线性变化,节点从始至终都未产生任何破坏现象。建立铸钢节点的有限元分析模型来开展相关分析工作,结果显示有限元分析所得数据与试验数据吻合较好,说明该有限元模型能够很好地对节点实际受力情况进行模拟。借助有限元模拟的方式,进一步对铸钢节点的破坏模式展开分析,得出该铸钢节点在7.00倍设计荷载作用下进入屈服阶段、在10.69倍设计荷载作用下达到其极限承载力的结论,表明该铸钢节点设计安全可靠,满足规范要求,安全冗余度较高。

关键词: 铸钢节点; 足尺试验; 有限元分析; 设计荷载; 航站楼
中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671－9379(2026)08－0026－09
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20241227001

Mechanical Behavior of Full-Scale Cast Steel Joints in the T2 Terminal of Hefei Xinqiao International Airport

DENG Qiang[1], *WANG Jingfeng*[2,3,4*], *LUO Jie*[1], *LIU Yunfei*[1], *TANG Guowang*[1], *LIU Jin*[1], *GUO Lei*[2], *LIU Shi*[2]
(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. College of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Anhui Collaborative Innovation Center of Advanced Steel Structure Collaborative Technology and Industrialization, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)
*Corresponding author: jfwang@hfut.edu.cn

Abstract: The roof of the T2 terminal of Hefei Xinqiao International Airport uses complex cast steel joints. In view of the multi-member intersection and complex force conditions at key cast steel joints, mechanical performance tests and finite element analyses were carried out on the full-scale cast steel joints used in the actual project of Xinqiao International Airport to verify the safety and reliability of the design. The mechanical performance test of full-scale cast steel joints

收稿日期:2024-12-27
基金项目:国家自然科学基金(52108130)
作者简介:
邓 强(1975—),男,学士,高级工程师,主要从事钢结构和建筑施工方面的研究。E-mail:deng_qiang@sohu.com。
通信作者:
王静峰(1976—),男,博士,教授,主要从事钢结构和组合结构方面的研究。E-mail:jfwang@hfut.edu.cn。

showed that the joints remained in a linear elastic state under twice the design load. Their strains changed approximately linearly with the load, and no damage occurred throughout the test. A finite element analysis model of the cast steel joints was constructed for relevant analyses. The results showed that the finite element analysis results agreed well with the test data, indicating that the finite element model could effectively simulate the actual stress state of the joints. The failure behavior of cast steel joints was further analyzed by finite element simulation. The analysis showed that the cast steel joint entered the yield stage under 7 times the design load and reached its ultimate bearing capacity under 10.69 times the design load. This indicates that the design of the cast steel joint is safe and reliable, meets code requirements, and has high safety redundancy.

Keywords: cast steel joint; full-scale test; finite element analysis; design load; terminal

随着我国社会经济快速发展,基础设施建设大力推进,机场航站楼、高铁站、体育场等大跨度空间结构建筑拔地而起。在大跨度空间结构中,不可避免地出现多杆交汇于同一节点的问题,这些节点往往处于结构的关键位置,受力状态复杂,是保障整体结构安全的核心部位[1]。

传统节点多采用螺栓连接或焊接连接,存在节点区域板件密集、焊接应力集中等问题。铸钢节点采用整体浇筑成型,设计灵活,不仅受力性能优良,且造型美观,可有效解决关键节点受力复杂的难题[2],被广泛应用于大跨度空间结构中。长江大跨越输电塔、重庆江北国际机场新航站楼、杭州西站站房、中国援所罗门群岛太平洋运动会体育场等标志性复杂钢结构,均采用铸钢节点并取得良好应用效果[3-10]。

合肥新桥国际机场的建设对安徽省发展意义重大、影响深远,是推动安徽对外开放、融入长三角一体化发展的重要枢纽,也是打造长三角世界级机场群的关键组成部分。本文依托合肥新桥国际机场T2航站楼扩建工程(机场效果图见图1),对工程实际采用的铸钢节点开展足尺受力性能试验与有限元分析,为该工程铸钢节点的应用提供技术支撑,也为铸钢节点在机场、高铁等大跨度空间结构中的设计与应用提供参考。



图1　机场效果图

Fig. 1　Airport rendering

1　工程概况

合肥新桥国际机场航站楼钢屋盖投影面积约为14.6万m^2,主楼钢屋盖投影面积约为8.6万m^2,屋盖尺寸南北向长477 m,东西向宽290 m,钢屋盖采用双曲斜交立体桁架,最大跨度为65 m,最大悬挑为27 m,屋盖跨度大、落差大,机场主楼屋盖示意图见图2。主楼高区屋盖支承于下部38根支承柱顶部,柱顶与屋盖连接区域杆件数量多、受力大,该区域钢柱柱顶及部分桁架交叉位置杆件相交夹角较小的节点,均采用铸钢节点。该类节点采用G20Mn5铸钢材质,共445个。铸钢节点数量多、实际受力复杂,其安全性与可靠性直接关系到整体结构安全,开展其受力性能研究对保障结构安全至关重要。节点位置示意及实体图片如图3所示。

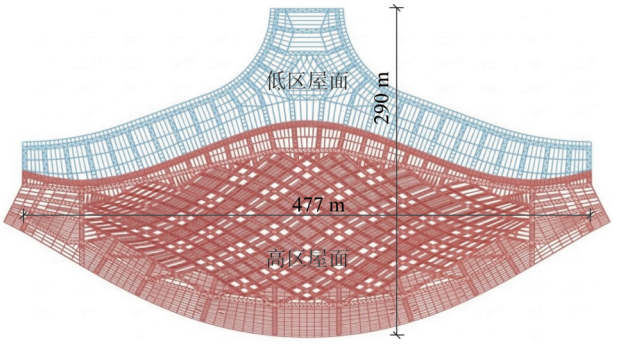
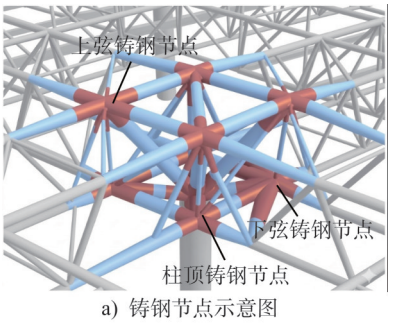


图2　机场屋盖示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the airport roof



a) 铸钢节点示意图



b) 铸钢节点实体图

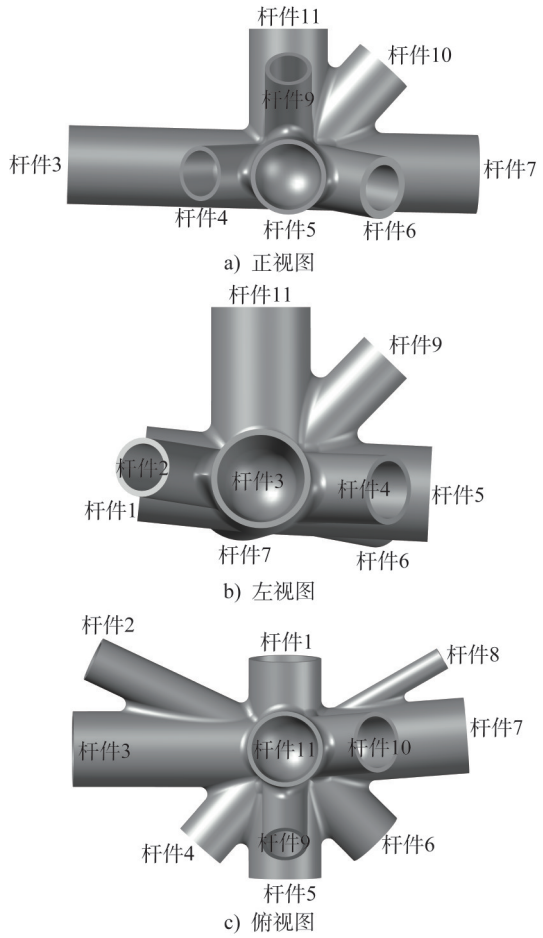
图3　铸钢节点图

Fig. 3　Drawings and pictures of cast steel joints

2 试验概况

2.1 节点试件

为了更好地模拟实际工程的应用场景，考虑试验条件、试验难度、结果可靠性等因素，试验试件选取合肥新桥国际机场工程中使用的足尺空间铸钢节点(图4)。试件高1.21 m、长2.62 m、宽1.59 m，共有不同方向的11根杆件，各杆件截面尺寸及方向信息见表1。节点试件铸钢材料为G20Mn5，进行调制处理后，铸钢材料屈服强度为391 MPa，抗拉强度为548 MPa，屈强比为0.71，伸长率为30.5%，力学性能与普通低合金结构钢相近，强度储备良好，各项指标均满足相关规范要求。



a) 正视图　b) 左视图　c) 俯视图

图4 铸钢节点试件示意图

Fig. 4 Cast steel joint specimen diagram

2.2 试验装置

试验地点是上海市中治钢构全方位加载结构试验室，足尺空间铸钢节点试验加载装置为3 000 t全方位加载开台式球形反力架，外径8 m，内径6 m，可以满足在360°空间任一方向试验加载的要求，加载装置见图5。

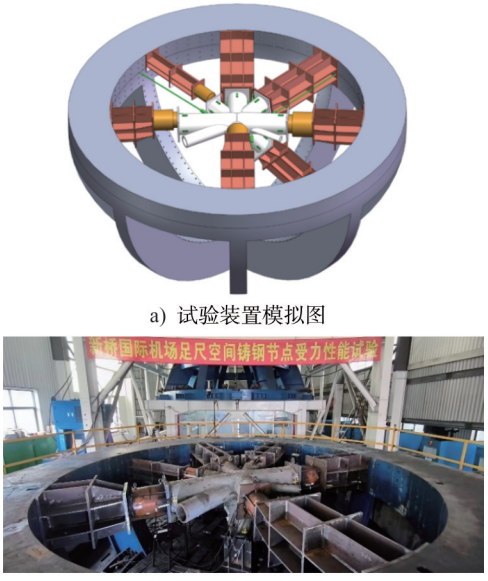
2.3 加载制度

根据节点杆件截面信息和预模拟得到的轴力情况，对1、3、4、7杆件进行加载，对5、6、10、11杆件进行固定。依据《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)[11]的规定：铸钢节点检验性试验的试验荷载应不低于最大内力设计值的1.3倍，破坏性试验的试验荷载应不低于最大内力设计值的2.0倍。为了更好地探究此铸钢节点的受力性能，本次足尺空间铸钢节点试验虽然属于检验性试验，但试验中的最大试验荷载采用2.0倍的最大内力设计值，杆件轴力信息见表2。加载分十级进行，每级加载为2.0倍的最大内力设计值的10%，每级持荷5 min，最终加载到2.0倍的最大内力设计值后，分五级进行卸载，节点加载制度见表3。

表1 节点尺寸信息

Table 1 Joint size information

杆件编号	杆件截面/mm	杆件终点坐标/mm		
		x	y	z
1	φ480×30	0	597	61
2	φ299×30	−1 264	595	94
3	φ500×30	−1 400	0	37
4	φ351×30	−560	−640	−20
5	φ480×30	0	−849	−42
6	φ400×53	597	−595	−111
7	φ500×30	1 196	91	−26
8	φ152×30	1 040	599	31
9	φ299×30	0	−627	646
10	φ402×30	604	46	666
11	φ500×30	0	0	900



a) 试验装置模拟图　b) 试验装置实景图

图5 加载装置

Fig. 5 Loading device

表2　杆件轴力信息

Table 2　Axial force information of members

杆件编号	2.0倍设计荷载N_0/kN	最大试验荷载N_1/kN
1	−2 695	−2 765
3	−3 299	−3 425
4	−1 921	−2 002
7	−4 537	−4 539

杆件1、3、4、7均为受压加载，杆件5、6、10、11均为固定杆件，当对加载杆件采用千斤顶主动进行加载时，5、6、10、11号杆件被动承受荷载，以保持受力平衡和系统稳定。

由于加载条件有限，加载难度较大，人力控制油泵加载无法精确控制加载数值，且由于加载杆件和加载方向较多，4个加载杆件在加载过程中互相影响，导致加载数值不稳定，实际加载很难保证每一级加载数值和预先制定的加载制度中加载数值相同，实际的加载制度见表4。

表3　预先制定的加载制度

Table 3　The pre-established loading system

加载等级	2.0倍设计荷载倍数/%	杆件端部荷载加载值/kN							
		杆件1	杆件3	杆件4	杆件7	杆件5	杆件6	杆件10	杆件11
1	10	−269.5	−329.9	−192.1	−453.7				
2	20	−539.0	−659.8	−384.2	−907.4				
3	30	−808.5	−989.7	−576.3	−1 361.1				
4	40	−1 078.0	−1 319.6	−768.4	−1 814.8				
5	50	−1 347.5	−1 649.5	−960.5	−2 268.5				
6	60	−1 617.0	−1 979.4	−1 152.6	−2 722.2				
7	70	−1 886.5	−2 309.3	−1 344.7	−3 175.9				
8	80	−2 156.0	−2 639.2	−1 536.8	−3 629.6	被动受载	被动受载	被动受载	被动受载
9	90	−2 425.5	−2 969.1	−1 728.9	−4 083.3				
10	100	−2 695.0	−3 299.0	−1 921.0	−4 537.0				
11	80	−2 156.0	−2 639.2	−1 536.8	−3 629.6				
12	60	−1 617.0	−1 979.4	−1 152.6	−2 722.2				
13	40	−1 078.0	−1 319.6	−768.4	−1 814.8				
14	20	−539.0	−659.8	−384.2	−907.4				
15	0	0	0	0	0				

2.4　测量方案

2.4.1　应变片布置

在试验过程中，采用单向应变片来测量各杆件外表面的应变情况，采用应变测试仪实时记录杆件端部加载值和随着荷载变化的应变值。在每根圆管杆件的同一截面均匀布置4个应变片，安装在位于距离圆管杆件端口200 mm的截面处。在4个加载杆件和4个固定杆件的端部沿四周均布4个应变片，应变片布置见图6。

2.4.2　位移计布置

采用位移计来测量加载杆件和固定杆件的轴向位移，位移计沿杆件轴向方向布置，用鱼线与位移计尾部连接，鱼线另一端通过挂钩磁铁固定于加载架或辅助支墩上，位移测试仪实时记录杆件端部加载值和随着荷载变化的位移值，在1、3、4、5、6、7杆件轴向方向各布置1个位移计，应变片和位移计布置见图7。

3　试验结果与分析

3.1　试验现象

首先进行预加载，检验各设备是否正常使用，保证试验正常进行，随后正式加载。在一级、二级加载过程中，可以听见加载装置发出一些巨大的“砰砰”声响，加载力出现小幅回落与反弹，说明此时铸钢节点和加载装置之间的空隙正在慢慢消除。在三至六级的加载过程中，偶尔也会出现巨大的声响，推测为固定螺栓错动所致；之后的加载过程中，加载3号杆件时7号杆件荷载同步增长，反之亦然，主要因3号与7号杆件为对向加载。随加载等级的提高，声响频率逐渐增加，到十级加载时声响最为

表4 实际加载制度

Table 4 The actual loading system

加载等级	杆件端部实际加载值/kN			
	加载杆件1	加载杆件3	加载杆件4	加载杆件7
1	−261.0	−278.0	−214.0	−492.0
2	−547.0	−705.0	−413.0	−1 026.0
3	−852.0	−984.0	−590.0	−1 484.0
4	−1 105.0	−1 416.0	−770.0	−1 843.0
5	−1 373.0	−1 729.0	−955.0	−2 469.0
6	−1 635.0	−1 967.0	−1 177.0	−2 824.0
7	−1 911.0	−2 363.0	−1 364.0	−3 115.0
8	−2 209.0	−2 712.0	−1 626.0	−3 742.0
9	−2 485.0	−3 015.0	−1 752.0	−4 056.0
10	−2 759.0	−3 386.0	−1 963.0	−4 535.0
11	−2 151.0	−2 642.0	−1 545.0	−3 632.0
12	−1 601.0	−1 966.0	−1 096.0	−2 711.0
13	−1 032.0	−1 283.0	−710.0	−1 882.0
14	−469.0	−634.0	−388.0	−896.0
15	0	0	0	0

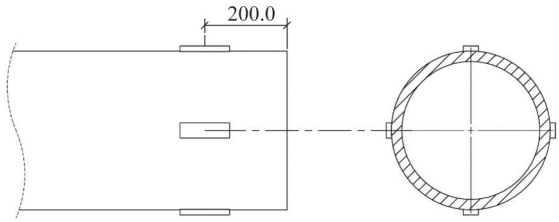


图6 应变片布置(单位:mm)

Fig. 6 Arrangement of strain gauges (unit:mm)

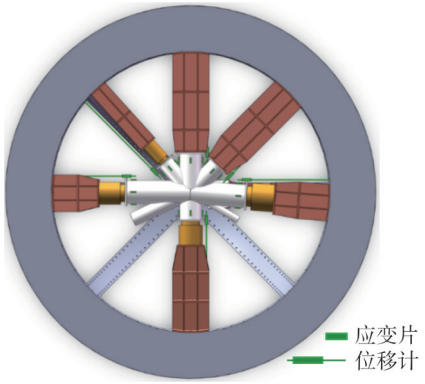


图7 应变片和位移计布置

Fig. 7 Arrangement of strain gauges and displacement meters

频繁。

加载完成后逐级卸载,卸载过程数据平稳回落,卸载完毕后数据基本归零。整个试验过程中,铸钢节点试件未出现裂缝、肉眼可见变形及其他破坏现象,表明试验方案合理可行,试验现场实景见图8。



图8 加载过程实景

Fig. 8 Live scene of loading process

3.2 荷载–应变曲线

根据采集仪采集的杆件应变与荷载数据,计算各杆件杆端应力,应力计算公式为$\sigma=E\varepsilon$,其中σ为计算应力,E为弹性模量,ε为实测应变。图9中的应变值为各杆件4个监测点测得应变的平均值,由图9可以得出:

(1) 在加载过程中,各加载杆件应变随荷载基本呈线性变化,杆端最大应变均小于材料屈服应变,且应变较小,表明2倍设计荷载作用下,铸钢节点未发生屈服,始终处于弹性变形状态,安全储备充足。

(2) 在整个铸钢节点加载过程中,7号加载杆件应变最大,峰值达-274×10^{-6},其应力约为56.4 MPa,原因是该杆件加载力最大,加载值最大达到4 535 kN,为所有杆件中受力最不利杆件。

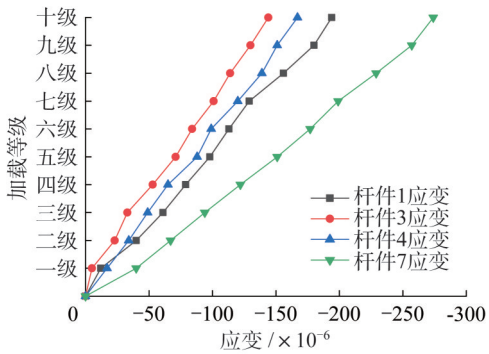


图9 各杆件荷载–应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of members

3.3 荷载–位移曲线

根据测得的荷载值和位移值,绘制出荷载-位移曲线,由图10可以得出:

（1）铸钢节点各杆件的绝对位移较小，最大不超过8 mm。铸钢节点的竖向位移、固定杆件5和6的轴向位移近乎为零。3号与7号杆件为对向加载，加载力与位移均最大，两者最终位移叠加后，节点中心水平位移仅为0.725 mm，表明节点整体变形很小[9]。

（2）4号加载杆件位移曲线呈先回落再反弹的变化特征，原因是该杆件位置特殊，紧邻3号杆件、在7号杆件的斜对侧，易受这两个杆件的影响。由于7号杆件的加载力最大，最大值达到4 535 kN，而4号杆件的加载力最小，最大值只有1 963 kN，7号和4号杆件是斜对向加载，因此7号杆件加载是可以影响到4号杆件的；另外，3、4号杆件在同一侧，3号杆件加载最大值达到3 386 kN，在加载过程中也会对4号杆件的加载产生影响。

（3）3号杆件位移曲线也存在小幅回落与反弹现象，但幅度小于4号杆件，主要因3号杆件加载力较大，受其他杆件影响相对较小。此外，加载方式、加载顺序及设备老旧等因素，也导致各杆件加载过程相互干扰，位移曲线出现波动。

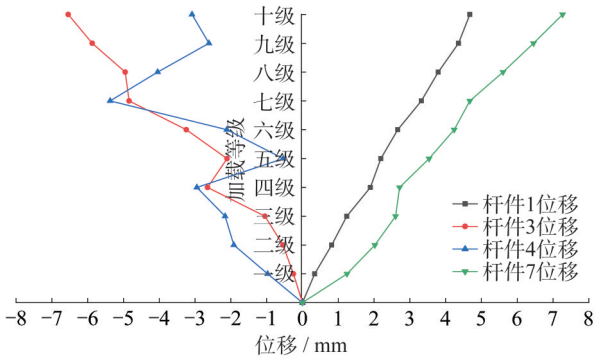


图10　各杆件荷载–位移曲线

Fig. 10　Load-displacement curves of members

4　有限元分析

4.1　有限元模型的建立

用三维建模软件SOLIDWORKS对铸钢节点进行精细化建模，将其导入ABAQUS有限元软件中进行模拟分析。由于铸钢节点杆件数量多，节点形状不规则，采用C3D10四面体单元模拟，见图11。铸钢材料G20Mn5的屈服强度取391 MPa，弹性模量取206 GPa，泊松比取0.3。材料本构关系选用三折线随动强化模型[8]，强化段切线模量取三折线随动强化模型线性强化段切线模量的2%。

根据铸钢节点试验的实际情况，对模型进行边界条件和荷载条件的设定，见图12。在各杆件端面中心构建参考点与局部参考系，参考点与杆件端面进行耦合约束，将杆件5、6、10、11底面设为完全固定约束状态，在杆件

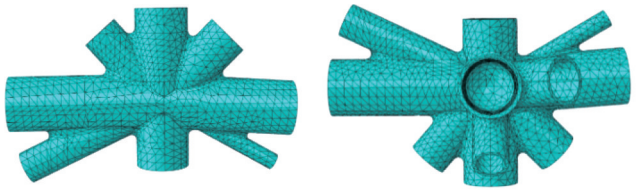


图11　有限元网格划分

Fig. 11　Finite element meshing

1、3、4、7的参考点施加集中力，从而将荷载向各杆件进行传递[12-13]，集中力采用实际试验的加载制度（表4），以验证模拟结果和试验结果是否相吻合。

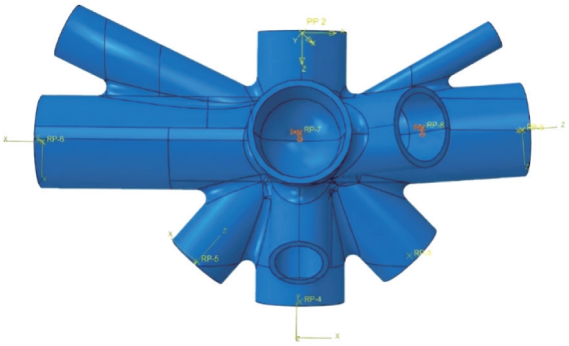


图12　铸钢节点边界和荷载施加

Fig. 12　Cast steel joint boundary and load application

4.2　有限元分析结果

由铸钢节点有限元计算的应力云图（图13）可以得出，在2.0倍设计荷载作用下，铸钢节点未发生破坏，有较大的安全冗余度，整体处于完全弹性状态，应力集中现象出现在7号杆件端部，此处为全节点应力最大处，应力为114.5 MPa。7号杆件应变测量处的应力模拟值为53.6 MPa，与试验值56.4 MPa基本一致，表明有限元模型建模合理，可准确反映节点实际受力特征。

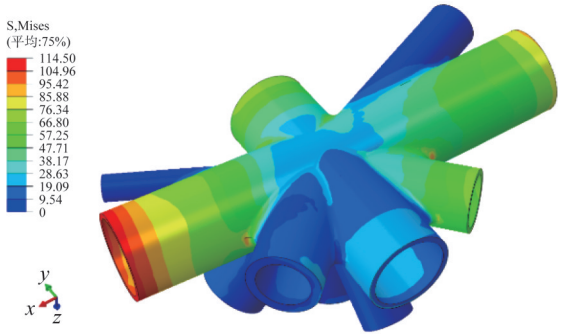


图13　铸钢节点模型应力云图（单位：MPa）

Fig. 13　Stress contour of cast steel joint model（unit：MPa）

4.3　有限元结果和试验结果对比

通过有限元分析提取应变、荷载的模拟数据，得到荷

载-应变曲线，并与试验的荷载-应变曲线进行对比，发现有限元结果与试验结果吻合良好（图14），有限元计算值和试验值的比值在0.87～1.03之间（表5），差值不大，总体在可接受范围内，表明有限元建模合理。

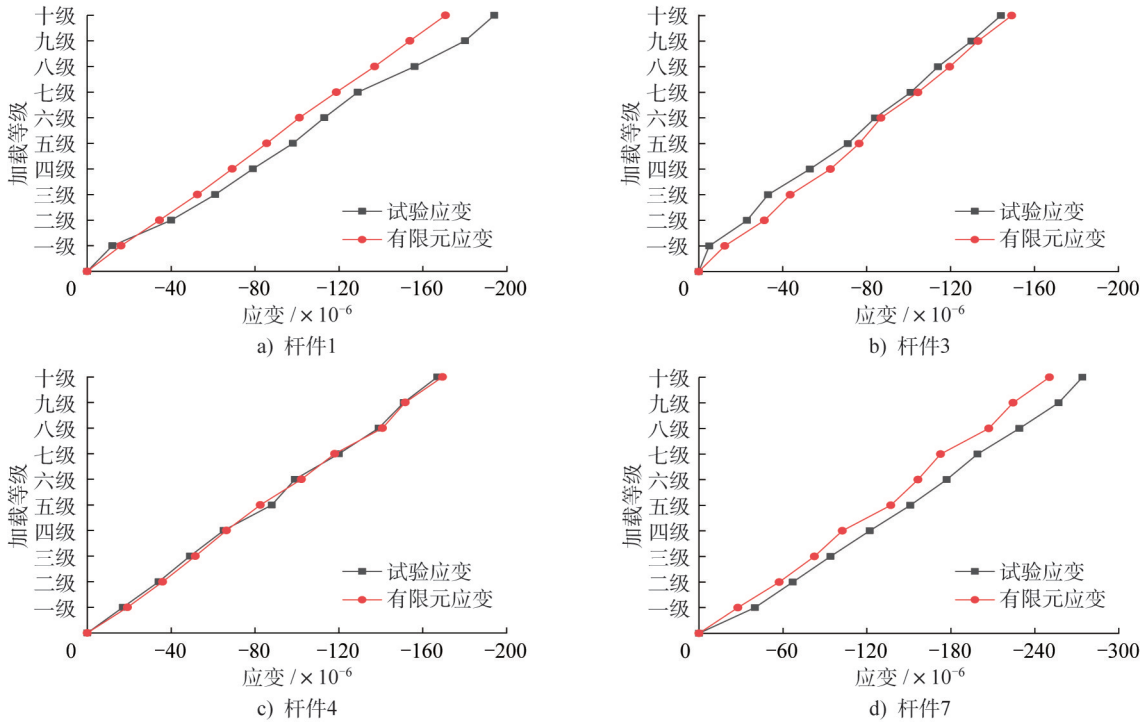


图14 有限元和试验荷载–应变曲线对比

Fig. 14 Comparison of load-strain curves between finite element analysis and test

表5 铸钢节点应变试验值与有限元计算值比较

Table 5 Comparison of strain between test and finite element analysis results of cast steel joints

杆件编号	试验值/$\times10^{-6}$	计算值/$\times10^{-6}$	计算值/试验值
1	−197	−171	0.87
3	−144	−149	1.03
4	−167	−169	1.01
7	−274	−251	0.92

通过有限元模拟提取位移、荷载的模拟数据，得到荷载-位移曲线，并将其与实测荷载-位移曲线进行对比，可知有限元结果与试验结果吻合良好（图15），除了4号加载杆件的个别数值外，其余杆件位移的有限元计算值和试验值的比值在0.91～1.18之间（表6），在可接受范围内。有限元模拟与试验结果存在小幅偏差，主要原因是有限元模型为理想状态，而实际试验受加载条件、设备精度、杆件接触间隙等因素影响，导致数据存在差异。

4.4 铸钢节点极限荷载

由上述可知有限元模型具有较高的可靠性，可用于节点极限承载力分析。考虑材料非线性与几何非线性，对铸钢节点开展弹塑性分析，确定极限承载力。结果表明，7号杆件端部受力最大且出现应力集中现象，为节点关键受力区域，以该位置为特征点，绘制荷载因子（实际荷载/设计荷载）-轴向位移曲线（图16）。

由曲线可知：荷载较小时，节点处于弹性阶段，位移随荷载线性增长；当荷载因子达7.00时，7号杆件端部开始进入屈服阶段，节点其余区域仍保持弹性（图17）；荷载继续增加，7号杆件端部应力逐渐积累，塑性区逐步扩展，节点承载力持续上升，说明节点进入塑性后仍具有较大的承载能力。

依据《铸钢节点应用技术规程》（CECS 235—2008）[14]，取荷载因子-位移曲线刚度降至初始刚度10%时的荷载为极限荷载，即当荷载因子为10.69时，7号杆件端部轴向位移达到最大为59.27 mm，随后节点丧失承载能力、发生破坏（图18）。经上述有限元分析可知，足尺空间铸钢节点的极限承载力为设计荷载的10.69倍，满足CECS 235—2008[14]中有限元分析所得极限承载力应大于3倍荷载设计值的要求。

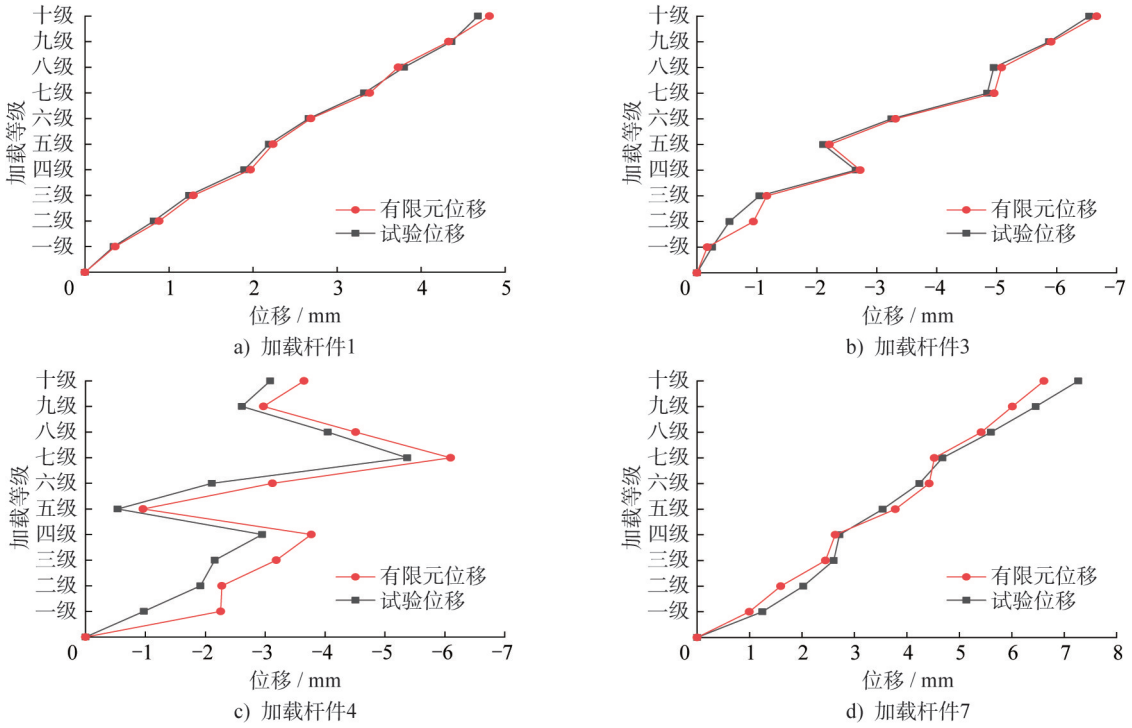


图15　有限元和试验荷载–位移曲线对比

Fig. 15　Comparison of load-displacement curves between finite element analysis and test

表6　铸钢节点位移试验值与有限元计算值比较

Table 6　Comparison of displacement between test and finite element analysis results of cast steel joints

杆件编号	试验值/mm	计算值/mm	计算值/试验值
1	4.676	4.812	1.03
3	−6.544	−6.667	1.02
4	−3.083	−3.649	1.18
7	7.268	6.615	0.91

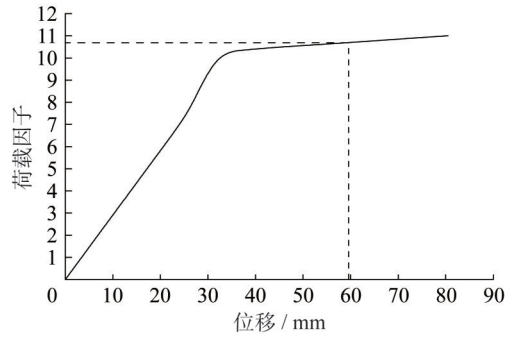


图16　7号杆件荷载因子–位移曲线

Fig. 16　Load factor-displacement curve of No. 7 member

5　结论

本文依托合肥新桥国际机场T2航站楼扩建工程，对足尺空间铸钢节点开展试验研究与有限元分析，系统探究了节点受力性能，主要结论如下：

（1）试验结果表明铸钢节点在2.0倍设计荷载的作

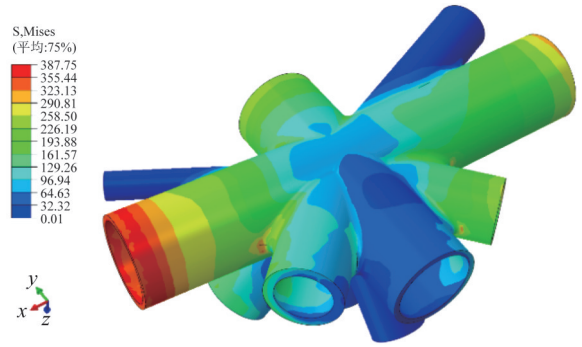


图17　7.00倍设计荷载节点应力云图（单位：MPa）

Fig. 17　Stress coutour of joint under 7.00 times the design load（unit：MPa）

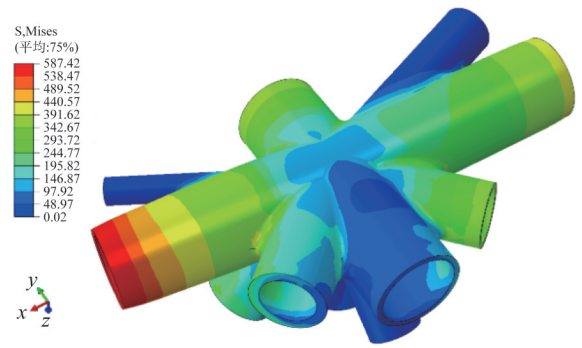


图18　10.69倍设计荷载节点应力云图（单位：MPa）

Fig. 18　Stress coutour of joint under 10.69 times the design load（unit：MPa）

用下处于线弹性状态，节点从始至终未出现破坏现象，各个测点的应变随荷载基本呈线性变化趋势，表明铸钢节点的安全储备较高，节点设计安全可靠。

（2）有限元分析结果与试验结果吻合较好，模型可有效模拟节点加载过程与受力状态，可作为节点极限承载力计算的依据。

（3）有限元弹塑性分析结果表明铸钢节点在7.00倍设计荷载作用下进入屈服阶段，极限承载力达设计荷载的10.69倍，远超规范限值，安全冗余度较高。

（4）本文采用的足尺试验方案、加载模式及有限元建模方法，可为机场、高铁站房等类似大跨度空间结构铸钢节点的研究与应用提供参考。

参考文献：

[1] 张旭巍. 120m跨长江航道模型实验厅铸钢球节点受力性能试验研究[J]. 施工技术，2014，43(20)：68-74. DOI：10.7672/sgjs2014200068.
ZHANG Xuwei. Testing research on bearing capacity of the cast steel ball joints of 120m-span model test hall [J]. Construction Technology，2014，43(20)：68-74. DOI：10.7672/sgjs2014200068.(in Chinese)

[2] 陈志华，姜玉挺，闫星宇，等. 天津图书馆铸钢节点力学性能[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2016，49(增刊1)：1-9.
CHEN Zhihua，JIANG Yuting，YAN Xingyu，et al. Mechanical properties of cast steel joints in Tianjin Library[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology)，2016，49(Suppl.1)：1-9.(in Chinese)

[3] 冷钟文，杜新喜，袁焕鑫，等. 黄石奥体中心体育场铸钢节点受力性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展，2019，21(3)：102-108. DOI：10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.03.012.
LENG Zhongwen，DU Xinxi，YUAN Huanxin，et al. Experimental study on the mechanical behavior of cast steel joint used in Huangshi Olympic sports center[J]. Progress in Steel Building Structures，2019，21(3)：102-108. DOI：10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.03.012.(in Chinese)

[4] 戴国欣，李万伟，邢世建，等. 重庆江北国际机场新航站楼大跨钢桁架铸钢节点性能研究[J]. 建筑结构学报，2005，26(4)：70-75，98. DOI：10.14006/j.jzjgxb.2005.04.011.
DAI Guoxin，LI Wanwei，XING Shijian，et al. Experimental study on cast steel joint of large span steel truss of Jiangbei International Airport in Chongqing[J]. Journal of Building Structures，2005，26(4)：70-75，98. DOI：10.14006/j.jzjgxb.2005.04.011.(in Chinese)

[5] 张仲林，张刚，高贯伟，等. 广西体育中心游泳跳水馆钢结构铸钢节点试验分析[J]. 广西城镇建设，2012(11)：69-74.
ZHANG Zhonglin，ZHANG Gang，GAO Guanwei，et al. On stress distribution analysis of cast steel node of steel structure by loading tests[J]. Cities and Towns Construction in Guangxi，2012(11)：69-74.(in Chinese)

[6] 张卫，李霆，许敏，等. 中国动漫博物馆复杂铸钢节点分析与研究[J]. 建筑结构，2020，50(8)：120-126. DOI：10.19701/j.jzjg.2020.08.019.
ZHANG Wei，LI Ting，XU Min，et al. Analysis and research on complex cast steel joints of China Comic & Animation Museum[J]. Building Structure，2020，50(8)：120-126. DOI：10.19701/j.jzjg.2020.08.019.(in Chinese)

[7] 施刚，赵华田，荣成骁，等. 天津周大福金融中心复杂铸钢节点性能分析[J]. 建筑结构，2022，52(4)：81-85. DOI：10.19701/j.jzjg.20210961.
SHI Gang，ZHAO Huatian，RONG Chengxiao，et al. Performance analysis on complex cast steel joint of Tianjin Chow Tai Fook Financial Center[J]. Building Structure，2022，52(4)：81-85. DOI：10.19701/j.jzjg.20210961.(in Chinese)

[8] 舒赣平，罗柯镕，王章轩，等. 385m超大型长江大跨越输电塔铸钢节点受力性能研究[J]. 工业建筑，2022，52(8)：34-40，47. DOI：10.13204/j.gyjzG22030222.
SHU Ganping，LUO Kerong，WANG Zhangxuan，et al. Research on cast steel joints used in a 385-meter super long-span transmission tower crossing the Yangtze River [J]. Industrial Construction，2022，52(8)：34-40，47. DOI：10.13204/j.gyjzG22030222.(in Chinese)

[9] 邢遵胜，叶冬晨，张之浩，等. 杭州西站站房钢屋盖复杂铸钢节点的性能分析[J]. 钢结构(中英文)，2023，38(2)：1-7. DOI：10.13206/j.gjgS22120101.
XING Zunsheng，YE Dongchen，ZHANG Zhihao，et al. Performance analysis of complex cast steel joint in the steel roof of Hangzhou west railway station[J]. Steel Construction (Chinese & English)，2023，38(2)：1-7. DOI：10.13206/j.gjgS22120101.(in Chinese)

[10] 董隽，袁理明，吴逸枫，等. 援所罗门群岛2023年太平洋运动会体育场铸钢节点受力性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展，2024，26(10)：88-93. DOI：10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.10.010.
DONG Jun，YUAN Liming，WU Yifeng，et al. Experiment on the mechanical behavior of cast steel joint used in the main stadium for 2023 Pacific games in Solomon Islands [J]. Progress in Steel Building Structures，2024，26(10)：88-93. DOI：10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.10.010.(in Chinese)

[11] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S].
JGJ 7—2010 Technical specification for space frame structures[S].(in Chinese)

[12] ZHANG B H，YANG B，WU T K，et al. Experimental and numerical study on the capability behavior of a thick-walled spatial cast-steel joint under complex load conditions [J]. Advances in Civil Engineering，2019，2019：8106041. DOI：10.1155/2019/8106041.

[13] ZHAO X Z，WANG C，YAN S，et al. Reliability-based capacity safety factor for G20Mn5 cast steel joints [J]. Engineering Structures，2025，323：119237. DOI：10.1016/j.engstruct.2024.119237.

[14] CECS 235—2008 铸钢节点应用技术规程[S].
CECS 235—2008 Technical specification for application of connections of structural steel casting[S].(in Chinese)