

# 湖北科技馆铸钢节点(ZGJ-3-15Q)

## 试验报告



同济大学

二零一九年三月

# 湖北科技馆铸钢节点(ZGJ-3-15Q) 试验报告

## 委托单位

中国建筑第三工程局有限公司

## 设计单位

中南建筑设计院股份有限公司

## 试验配合单位

同济-宝冶全方位加载试验室

## 主要研究人员

同济大学：赵宪忠、吴艾辉、肖凡、徐弋雯、温福平

报告执笔：肖凡

报告审核：赵宪忠

## 致谢

研究项目得到了中国建筑第三工程局有限公司、中南建筑设计院股份有限公司以及同济-宝冶全方位加载试验室的支持和指导，谨致谢意！

## 说明

本研究报告为同济大学的原创性工作，如引用本文内容，请注明原文出处。

2019 年 3 月

# 目录

1 工程概况.....	3
1.1 试验背景.....	3
1.2 试验目的.....	4
2 节点试验方案.....	5
2.1 试件设计.....	5
2.2 试验荷载确定.....	6
2.3 加载系统设计.....	8
2.4 加载制度.....	10
2.5 测试方案.....	10
3 试验现象及结果.....	15
3.1 材性试验结果.....	15
3.2 加载制度验证.....	15
3.3 试验现象及位移测试结果.....	17
3.4 应变测试结果.....	19
4 有限元分析.....	22
4.1 计算模型.....	22
4.1.1 几何模型和边界条件.....	22
4.1.2 加载方式.....	22
4.1.3 材性选择.....	23
4.1.4 单元选择.....	23
4.1.5 几何非线性.....	23
4.2 有限元分析结果.....	23
4.3 有限元分析结果（基于规范规定的材性参数）.....	28
5 结论.....	33

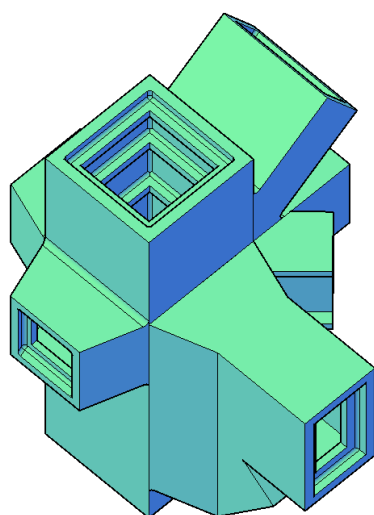
# 1 工程概况

## 1.1 试验背景

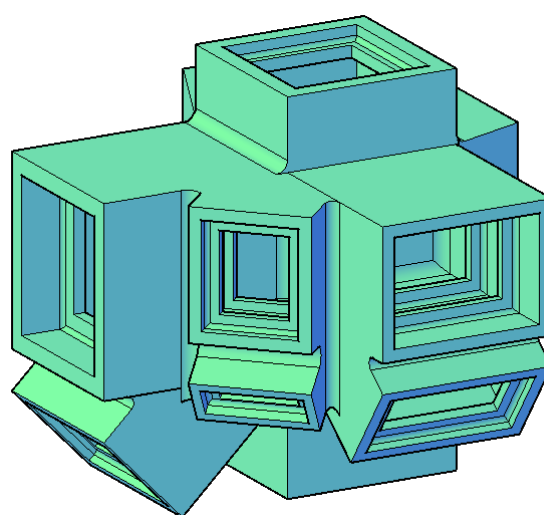
湖北科技馆工程中采用了铸钢节点。考虑到此类节点构型相对复杂、包含有多个杆件交汇点，节点尺寸较大、且所连杆件受力较大，因此有必要对该类节点进行缩尺模型试验，以验证节点的安全性。

根据设计要求，对五个典型铸钢 ZGJ-1-14F、ZGJ-2-5G、ZGJ-2-6F、ZGJ-3-14F 和 ZGJ-3-15Q 进行了缩尺比例为 1: 2.5 的节点试验，如图 1.1.1 所示。厂家提供的铸钢件及相连杆件材质和强度如表 1.1.1 所示。

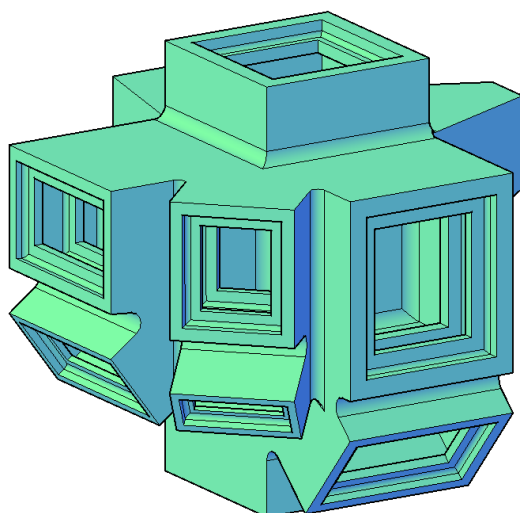
本报告为其中铸钢节点 ZGJ-3-15Q 的试验与分析结果。



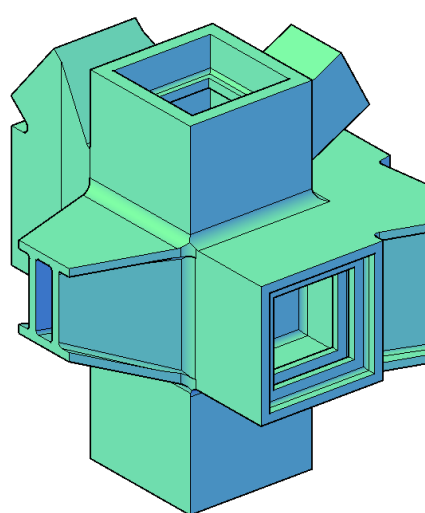
(a) ZGJ-1-14F



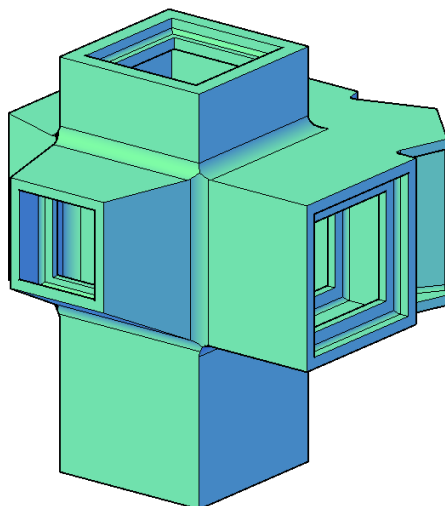
(b) ZGJ-2-5G



(c) ZGJ-2-6F



(d) ZGJ-3-14F



(e) ZGJ-3-15Q

图 1.1.1 铸钢节点示意图

表 1.1.1 铸钢节点和加焊管件的强度（单位：N/mm<sup>2</sup>）

牌号	拉伸性能		
	上屈服强度 $R_{eH}$ MPa (min)	抗拉强度 $R_m$ MPa (min)	断后伸长率 $A$ % (min)
ZG340-550H	340	550	15
Q345B	345	/	/

## 1.2 试验目的

试验应达到以下目标：

（1）考察铸钢节点在不利荷载工况作用下的应变发展规律，验证铸钢件是否能满足强度要求并确定其安全储备。

（2）通过将有限元分析结果与试验结果进行对比，验证有限元分析模型，并据此给出节点受力全貌。

（3）考察铸钢节点在进入塑性后的力学性能与关键杆件的破坏模式(如有)。

## 2 节点试验方案

### 2.1 试件设计

根据《铸钢节点应用技术规程》(CECS235:2008)第 4.4.6 条（铸钢试件应具有一定的外伸尺寸,以消除支座、加载等装置的约束对试验部位应力分布的影响）的要求,在节点试件的每个杆件端部均按设计要求的焊接方法连接了一段与实际工程材料相同的接管（接管壁厚与设计要求一致）;接管长度依据加载端对节点区域受力性态无影响并考虑加载装备的空间尺度等条件确定。同时,基于在各杆件端部施加试验荷载和固定试验节点的需要,在接管端部设置连接端板。

增加接管及端板后的 ZGJ-3-15Q 节点示意图如图 2.1.1 所示。ZGJ-3-15Q 节点各杆件基本信息如表 2.1.1 所示。

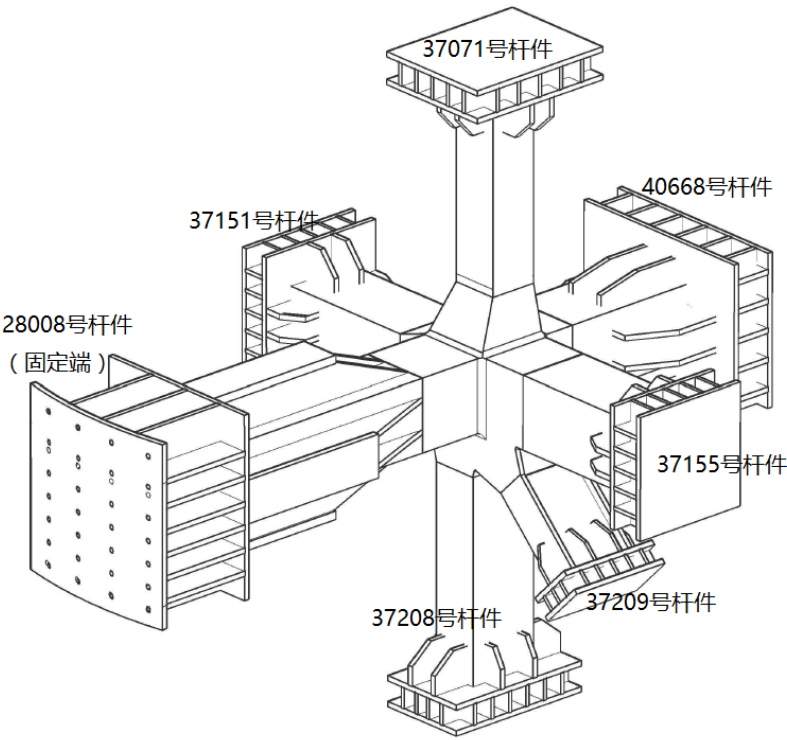


图 2.1.1 ZGJ-3-15Q 节点示意图

表 2.1.1 ZGJ-3-15Q 节点各杆件基本信息

序号	杆件编号	截面长度 (mm)	截面宽度 (mm)	铸钢件壁 厚(mm)	接管长度 (m)	接管壁厚 (mm)
1	1528					
2	1680					
3	28008	480	480	48	1.768	50

4	30625					
5	37071	320	320	28	1.3	30
6	37151	480	320	40	0.982	40
7	37155	480	480	32	1	30
8	37208	480	320	40	1.362	40
9	37209	480	240	28	0.665	28
10	40668	480	480	48	0.927	50

## 2.2 试验荷载确定

根据《铸钢节点应用技术规程》（CECS 235：2008）规定，铸钢节点进行破坏性试验时，试验荷载不应小于荷载设计值的 2.0 倍；同时，根据业主要求，在试验条件允许的情况下，在加载至设计荷载的 2.0 倍以后应继续加载，直至节点进入塑性或加载至设计荷载的 3.0 倍。据此进行了试验荷载确定、加载装置选用和加载能力确定。

试验荷载确定过程中，充分考虑了加载实现的可能性、以及节点/辅连杆件的受力性态一致性，对原始节点荷载进行适当简化与归并。考虑到作用于柱下端斜向支撑杆的荷载、以及节点处截面上的剪力及扭矩产生的应力水平很低，故予以忽略，主要施加作用于构件杆端的轴力和弯矩。节点试验所依据的设计荷载按照设计院方提供的工况组合中最不利工况确定。

对于 ZGJ-3-15Q 节点，设计院方提供了荷载组合(1)D1.2L1.4Wb0.84T0.84、(2) D1.35LS0.98S0.98 以及 (3) D1.35L0.98 这三种工况，且设计院方提供的原始节点荷载为平衡力系，通过分析确定荷载组合 D1.35L0.98 为最不利工况。杆件局部坐标定义按照设计院方提供的局部坐标系确定，红、绿、蓝三轴分别表示三个主轴（1、2、3 轴），如图 2.2.1 所示。

节点试验的缩尺比例为 1:2.5，且设计方要求的加载目标值为趋近于设计荷载的 3.0 倍；因此，在设计院提供的原始节点荷载（1.0 倍设计荷载）的基础上，根据应力等效原则进行加载值调整。此外，根据试验室加载千斤顶规格与油路条件，进行试验荷载归并，归并原则为：（1）归并前后节点处荷载作用效应基本一致；（2）归并后加载油路不宜过多，便于加载控制；（3）对于应力水平很低、且不影响节点受力行为的杆件，由于加载端条件限制，可予以调整。由此得到试验荷载、以及设计轴力与加载轴力的对比，详见表 2.2.1~2.2.3。

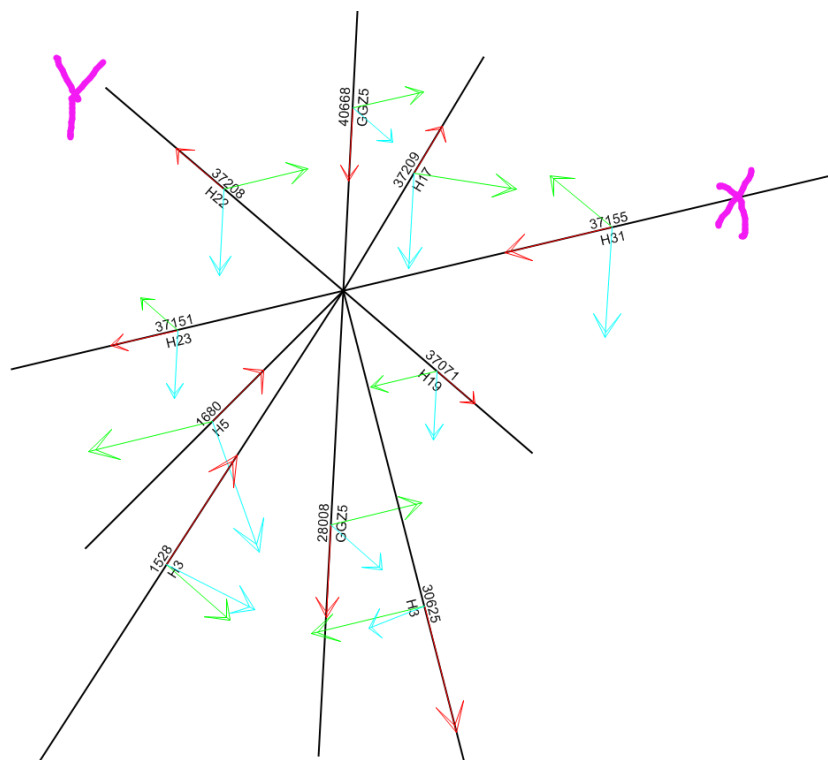


图 2.2.1 ZGJ-3-15Q 节点局部坐标系

表 2.2.1 ZGJ-3-15Q 节点 3.0 倍设计荷载

序号	杆件编号	N (KN)	M <sub>2</sub> (KN m)	M <sub>3</sub> (KN m)
1	1528	169.1	0	0
2	1680	-944.2	0	0
3	28008	-19696	-100.2	609.3
4	30625	-14.8	0	0
5	37071	-2643.9	3.5	164.7
6	37151	-3981.4	1059.1	438.6
7	37155	-2197.9	-167.5	17.4
8	37208	-2360.8	-466.4	-397.0
9	37209	-3457.2	288.2	-39.9
10	40668	-18664.5	1946.9	894.9

表 2.2.2 ZGJ-3-15Q 节点试验荷载

序号	杆件编号	千斤顶规格	N (KN)	M <sub>2</sub> (KN m)	M <sub>3</sub> (KN m)
1	1528				
2	1680				
3	28008	固定端			
4	30625				



5	37071	320t	-2643	3.5	164.7
6	37151	500t	-4130	1059.1	438.6
7	37155	200t	-1652	-167.5	17.4
8	37208	320t	-2643	-466.4	-397.0
9	37209	2*200t	-3304	288.2	-39.9
10	40668	2*500t+2*630t	-18665	1946.9	894.9

表 2.2.3 ZGJ-3-15Q 节点设计轴力与加载轴力对比

序号	杆件 编号	设计轴力	加载轴力	差值
		(KN)	(KN)	(%)
1	1528			
2	1680			
3	28008	固定端		
4	30625			
5	37071	-2643.9	-2643	0.04
6	37151	-3981.4	-4130	3.72
7	37155	-2197.9	-1652	调整杆件
8	37208	-2360.8	-2643	11.95
9	37209	-3457.2	-3304	4.44
10	40668	-18664.5	-18665	0.00

## 2.3 加载系统设计

本试验采用同济大学自行设计的同济-宝冶全方位加载球（如图 2.3.1 所示）进行加载，该加载装置适用于任意角度管件的空间节点加载。加载球内部净加载空间为直径 6m 的球形空间，其中赤道环梁上的最大加载吨位达 3000 吨，经圈上的最大加载吨位达 1000 吨。本试验中，由于赤道环梁上荷载较大，为保证加载球刚度及试验安全，节点加载使用上、下半球。

加载系统的总体设计思路为：将节点试验件的三维实体模型在 AutoCAD 中进行加载装置中的空间定位，找到最合理的安装方位；然后根据各加载端、固定端的受力及与多功能球形加载装置的相对位置关系，设计加载端、固定端连接件，满足强度与刚度要求。

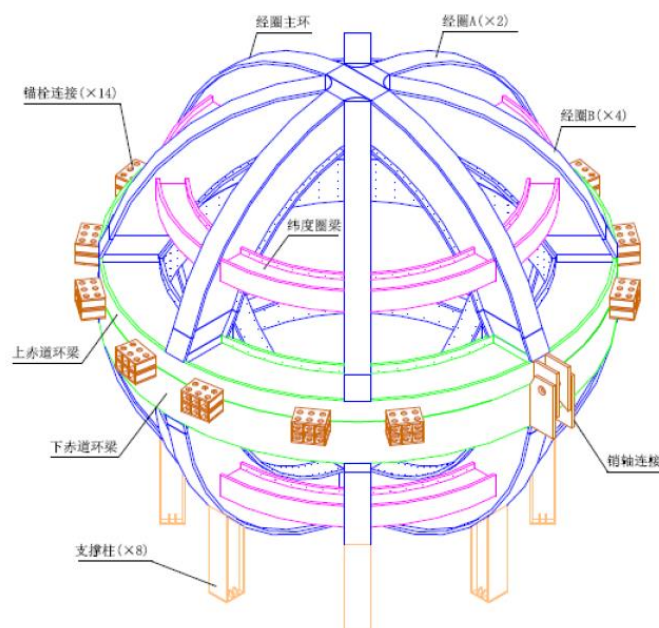


图 2.3.1 同济-宝冶全方位加载球装置

ZGJ-3-15Q 节点加载端具体设计步骤为：(1)对于受压弯作用的杆件(37071、37151、37155、37208、37209、40668 号杆件)，以千斤顶在接管端板上进行偏心顶推实现；(2) 试验最大荷载超过单个千斤顶加载能力(40668 号杆件)，则采用四台千斤顶并联加载，四台千斤顶合力的作用点即为轴力偏心位置。

ZGJ-3-15Q 节点固定端(28008 号杆件)具体设计步骤为：根据固定端受力情况，以螺栓连接件方式与加载球装置相连接，并保证其刚度。

加载系统设计完成后的 ZGJ-3-15Q 节点安装示意图如图 2.3.2 所示。

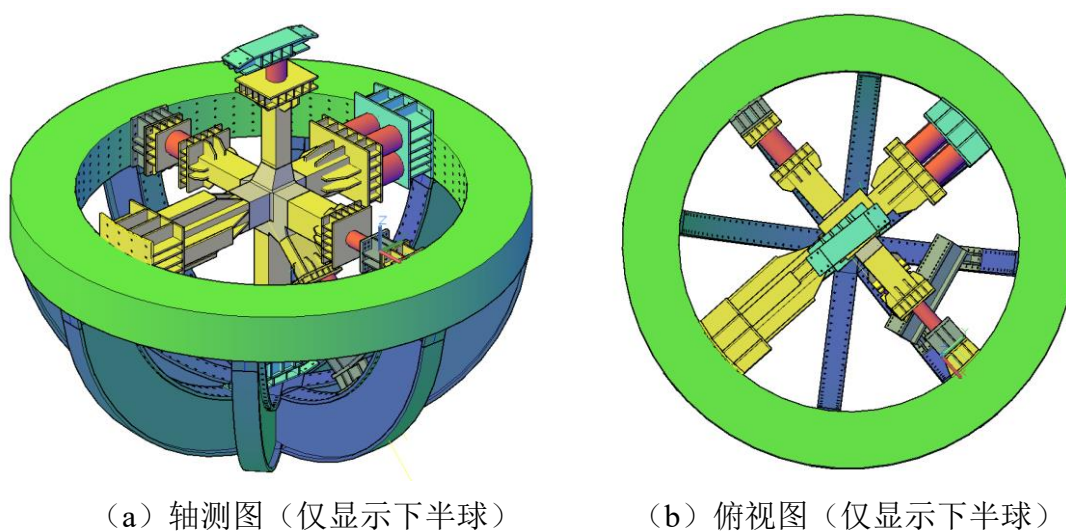


图 2.3.2 ZGJ-3-15Q 节点安装示意图

## 2.4 加载制度

本试验采用力控制加载，在每一个加载端进行等比例同步加载。加载分级进行，以  $0.1N_d$  ( $N_d$  为设计荷载值) 为级差，直至加载值  $3.0N_d$ 。加载时，每级荷载稳压 2min 后读取全局的应变、位移数据。加载结束后，稳压 3min 后卸载。

在进行正式加载前，进行了 5 级荷载的预加载，以调试试验加载系统和测试系统。ZGJ-3-15Q 节点具体加载制度见表 2.4.1。

## 2.5 测试方案

对节点试件加载过程中的位移与应变数据进行监测。测点布置分为三类：一是位移计，用以监控节点的空间变位以及固定端是否出现滑动，以保证试验安全；二是单向应变片，主要测量杆件内力；三是三向应变片，主要测量节点关键位置应力变化和发展规律。测点布置前，采用有限元分析软件 Abaqus 进行预分析，根据分析结果进行布置。

为了监控 ZGJ-3-15Q 节点的位移，在 ZGJ-3-15Q 节点域位置下表面（即杆件 37151 下方）的三个方向均布置一个位移计，编号 D1~D3；同时，在固定端 28008 号杆件接管端部布置两个方向的位移计，编号 D4~D5，以保证试验安全，如图 2.5.1 所示。



图 2.5.1 ZGJ-3-15Q 节点位移计 D1~D5 布置示意图（箭头方向为正）

表 2.4.1 ZGJ-3-15Q 节点加载制度

序号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
杆件编号		1528	1680	28008	30625	37071	37151	37155	37208	37209	40668
千斤顶规格		-	-	-	-	320t	500t	200t	320t	2*200t	2*500t+2*630t
加载制度（分级荷载下各加载端荷载值/kN）											
3.0 倍荷载 (最大加载值)				固 定 端		-2643	-4130	-1652	-2643	-3304	-18665
预 加 载	调零					0	0	0	0	0	0
	0.1 倍					-88	-138	-55	-88	-110	-622
	0.2 倍					-176	-275	-110	-176	-220	-1244
	0.3 倍					-264	-413	-165	-264	-330	-1867
	0.4 倍					-352	-551	-220	-352	-441	-2489
	0.5 倍					-441	-688	-275	-441	-551	-3111
正 式 加 载	调零					0	0	0	0	0	0
	0.1 倍					-88	-138	-55	-88	-110	-622
	0.2 倍					-176	-275	-110	-176	-220	-1244
	0.3 倍					-264	-413	-165	-264	-330	-1867
	0.4 倍					-352	-551	-220	-352	-441	-2489
	0.5 倍					-441	-688	-275	-441	-551	-3111
	0.6 倍					-529	-826	-330	-529	-661	-3733
	0.7 倍					-617	-964	-385	-617	-771	-4355
	0.8 倍					-705	-1101	-441	-705	-881	-4977
	0.9 倍					-793	-1239	-496	-793	-991	-5600

	1.0 倍					-881	-1377	-551	-881	-1101	-6222
	1.1 倍					-969	-1514	-606	-969	-1211	-6844
	1.2 倍					-1057	-1652	-661	-1057	-1322	-7466
	1.3 倍					-1145	-1790	-716	-1145	-1432	-8088
	1.4 倍					-1233	-1927	-771	-1233	-1542	-8710
	1.5 倍					-1322	-2065	-826	-1322	-1652	-9333
	1.6 倍					-1410	-2203	-881	-1410	-1762	-9955
	1.7 倍					-1498	-2340	-936	-1498	-1872	-10577
	1.8 倍					-1586	-2478	-991	-1586	-1982	-11199
	1.9 倍					-1674	-2616	-1046	-1674	-2093	-11821
	2.0 倍					-1762	-2753	-1101	-1762	-2203	-12443
	2.1 倍					-1850	-2891	-1156	-1850	-2313	-13066
	2.2 倍					-1938	-3029	-1211	-1938	-2423	-13688
	2.3 倍					-2026	-3166	-1267	-2026	-2533	-14310
	2.4 倍					-2114	-3304	-1322	-2114	-2643	-14932
	2.5 倍					-2203	-3442	-1377	-2203	-2753	-15554
	2.6 倍					-2291	-3579	-1432	-2291	-2863	-16176
	2.7 倍					-2379	-3717	-1487	-2379	-2974	-16799
	2.8 倍					-2467	-3855	-1542	-2467	-3084	-17421
	2.9 倍					-2555	-3992	-1597	-2555	-3194	-18043
	3.0 倍					-2643	-4130	-1652	-2643	-3304	-18665

为了监测 ZGJ-3-15Q 节点各杆件的内力，在 37071、37151、37155、37208、37209、40668 号杆件接管中间截面处各布置 8 个单向应变片，应变片布置于各边的三等分点处，用以反算实际加载的轴力和弯矩，如图 2.5.2(a)所示；在 28008 号杆件接管离该接管与铸钢件焊缝 600mm 截面处布置 4 个单向应变片，应变片布置于各边的中点处，用以反算轴力和弯矩，如图 2.5.2 (b) 所示。单向应变片一共 52 个，编号 S1~S52。

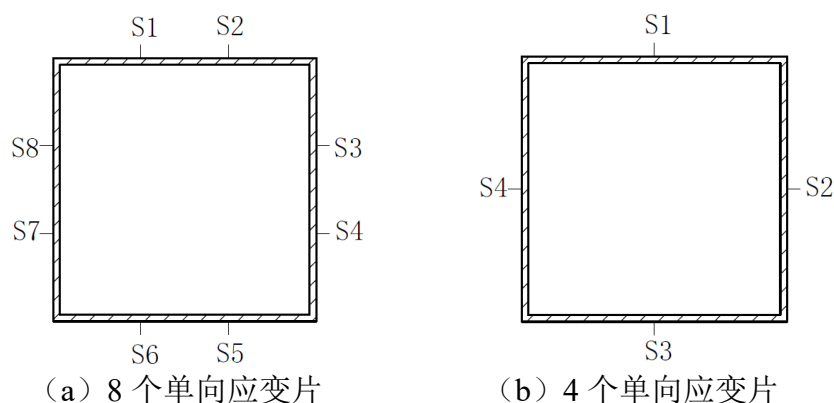


图 2.5.2 单向应变片布置示意图

为了监测 ZGJ-3-15Q 节点关键位置应力变化和发展规律，在 ZGJ-3-15Q 节点区域共布置 10 个三向应变片，编号 T1~T10。三向应变片的布置根据有限元预分析结果进行，布置于应力较大的区域以及几何变化的关键位置，用以测算其应力及发展规律。三向应变片测点布置如图 2.5.3 至 2.5.5 所示。

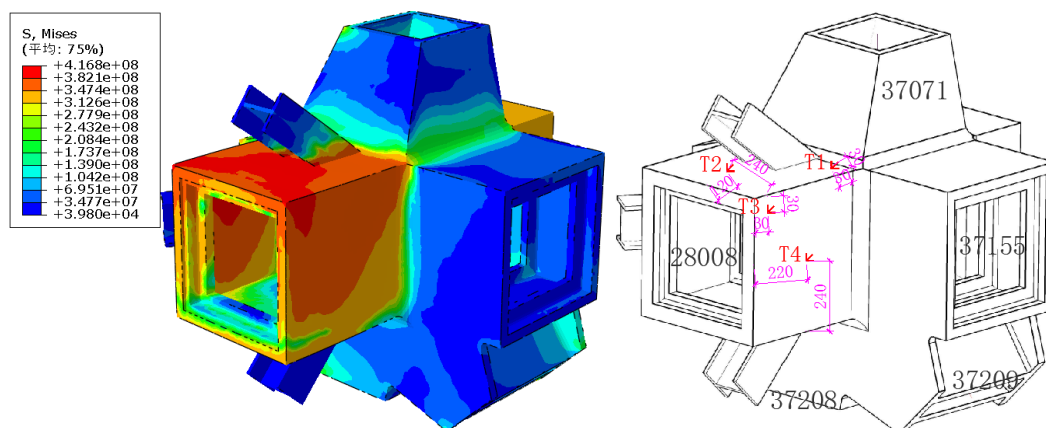


图 2.5.3 T1~T4 三向应变片位置示意图

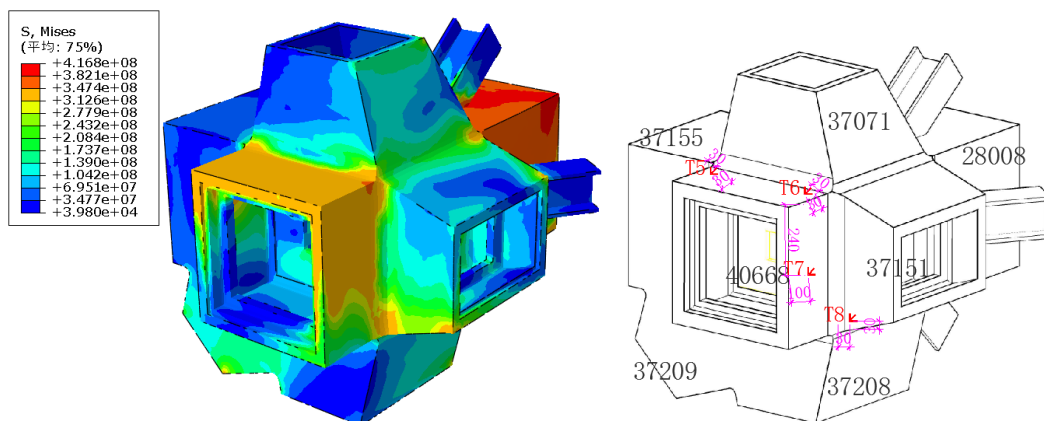


图 2.5.4 T5~T8 三向应变片位置示意图

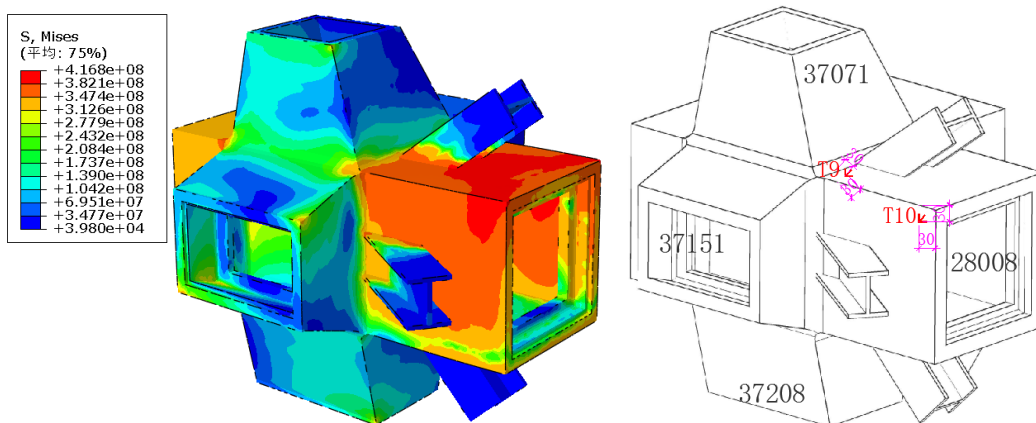


图 2.5.5 T9~T10 三向应变片位置示意图



3 试验现象及结果

3.1 材性试验结果

铸钢材料性能由标准拉伸试验确定。材性试件取自铸钢节点 ZGJ-1-14F 的零应力区部分的沿壁厚 1/4 位置处，试件取样方法和测试方法依据国家标准《金属材料室温拉伸试验方法》（GB/T 228-2002）的相关规定进行。材性试件规格数据见图 3.1.1 和表 3.1.1，共抽取 3 个材性试件。材性试验测得的铸钢屈服强度  $f_y$ 、极限强度  $f_u$ 、屈强比  $f_y/f_u$  和伸长率  $\delta$  等数据见表 3.1.2。

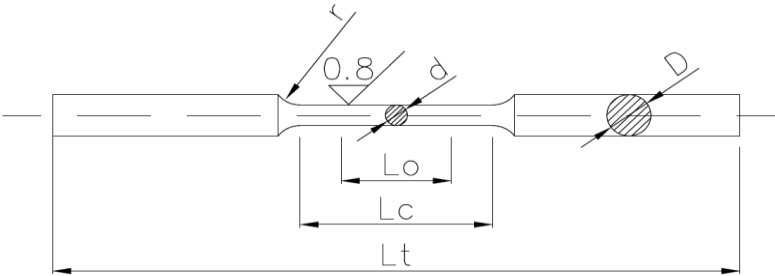


图 3.1.1 材性试件大样

表 3.1.1 铸钢材性试棒规格

试棒编号	式样	d	r	Lo	Lc	Lt	D
1	棒材	8	10	40	70	250	16
2	棒材	8	10	40	70	250	16
3	棒材	8	10	40	70	250	16

表 3.1.2 铸钢材性试验结果

试棒编号	式样	屈服强度	抗拉强度	屈强比	伸长率
		$f_y(\text{N/mm}^2)$	$f_u(\text{N/mm}^2)$	$f_y/f_u$	$\delta(\%)$
1	棒材	408	786	0.52	23.3
2	棒材	423	796	0.53	22.8
3	棒材	413	781	0.53	23.1

3.2 加载制度验证

图 3.2.1~3.2.2 给出了由各杆件上布置的单向应变片反算得到的杆件轴力随着荷载施加的增长曲线。可以看出，各加载端与固定端杆件轴力随着荷载的施加基本呈线性增大。对比由杆件上布置的单向应变片反算的轴力以及表 2.2.2 给出



的千斤顶需施加的轴力可知，各杆件由单向应变片反算得到的荷载值与千斤顶施加的荷载值基本相同。各杆件加载端或固定端差别都在 10%以内。  
因此，千斤顶施加的荷载是准确的。

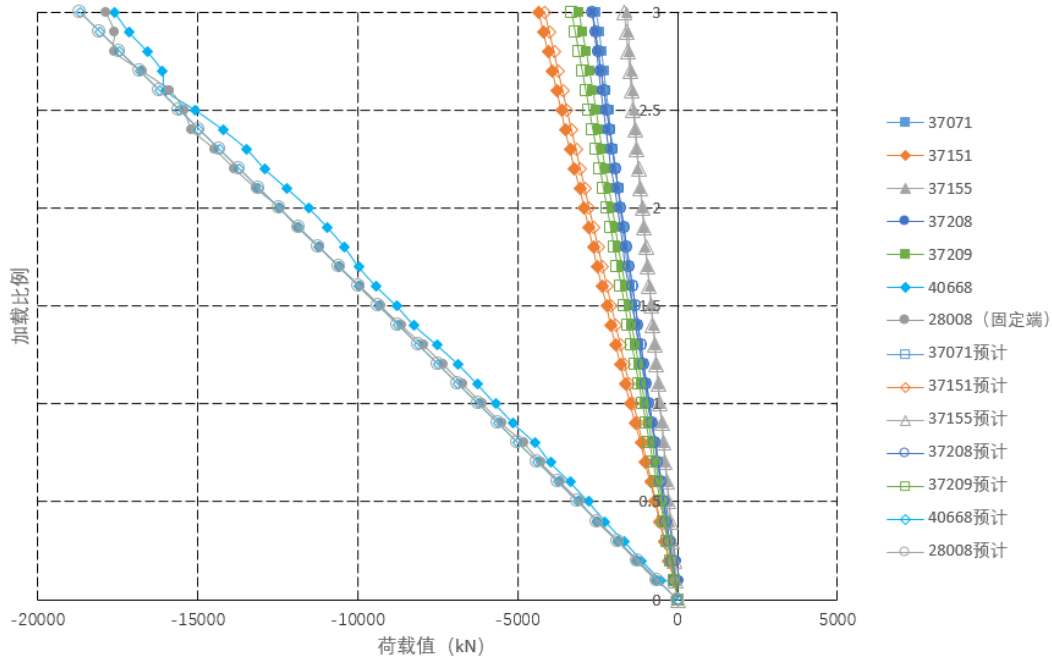


图 3.2.1 ZGJ-3-15Q 节点加载比例-荷载曲线（含固定端）

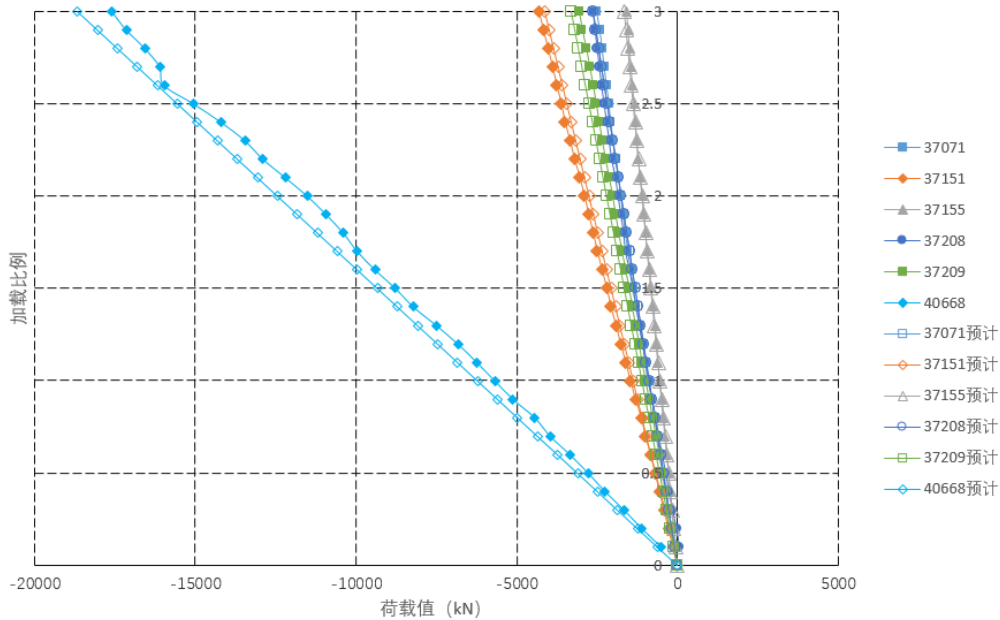


图 3.2.2 ZGJ-3-15Q 节点加载比例-荷载曲线（不含固定端）

### 3.3 试验现象及位移测试结果

整个试验过程中，ZGJ-3-15Q 节点处三个方向位移计 D1、D2 和 D3 所测量的位移最大值为 6.39mm（如图 3.3.1 所示），1 号位移计和 2 号位移计所测的位移基本呈线性发展。在水平方向，28008 号杆件所在的固端连接件处有源自承压型连接螺栓滑移产生的 0.98mm 水平位移（4 号位移计）；在竖直方向，28008 号杆件所在的固端连接件位移很小，最大竖向位移为 0.29mm（5 号位移计）。综上所述，节点 ZGJ-3-15Q 除刚体位移外，节点的变形很小。

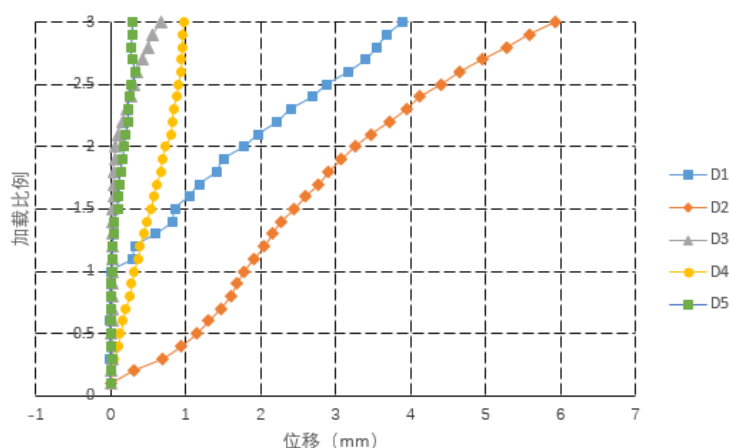


图 3.3.1 ZGJ-3-15Q 节点加载比例-位移曲线

整个试验过程中，ZGJ-3-15Q 节点无肉眼可见的宏观破坏现象。典型的试验照片如图 3.3.2~图 3.3.4 所示。



图 3.3.2 ZGJ-3-15Q 节点试验整体图



图 3.3.3 ZGJ-3-15Q 节点试验的分配梁装置图



图 3.3.4 ZGJ-3-15Q 节点试验的加载端图



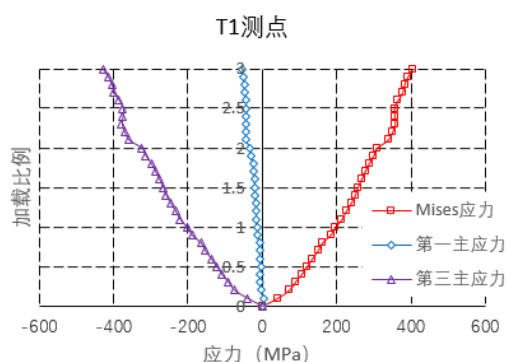
### 3.4 应变测试结果

图 3.4.1 给出了铸钢节点 ZGJ-3-15Q 各个测点处三向片的加载比例-应力变化曲线。以加载比例作为加载比例-应力变化曲线的纵坐标，以应力(MPa)作为横坐标。其中，第一主应力、第三主应力、等效 Mises 应力由三向应变片的微应变读数换算取得，换算公式如下。

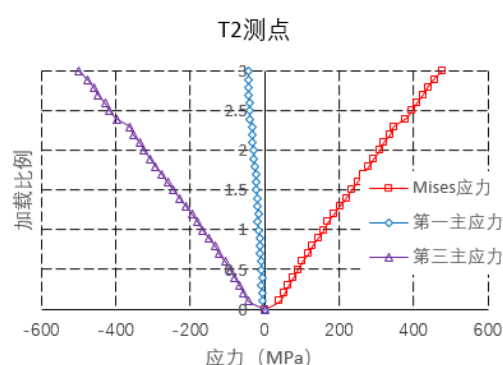
$$\sigma_1 = \left( \frac{E}{2(1-\nu)} (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}) + \frac{E}{1+\nu} \sqrt{\frac{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2}{2}} \right) 10^{-6}$$

$$\sigma_3 = \left( \frac{E}{2(1-\nu)} (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}) - \frac{E}{1+\nu} \sqrt{\frac{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2}{2}} \right) 10^{-6}$$

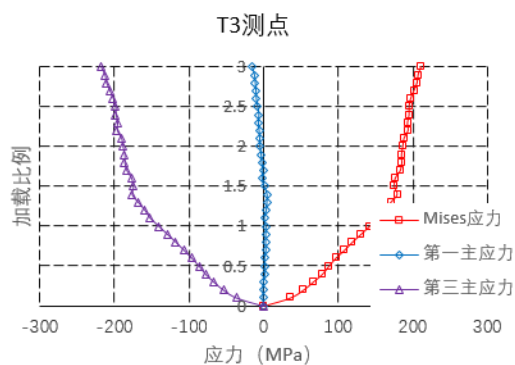
$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_3}$$



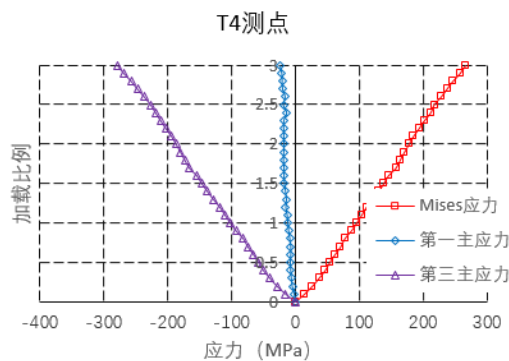
(a) T1 测点加载比例-应力曲线



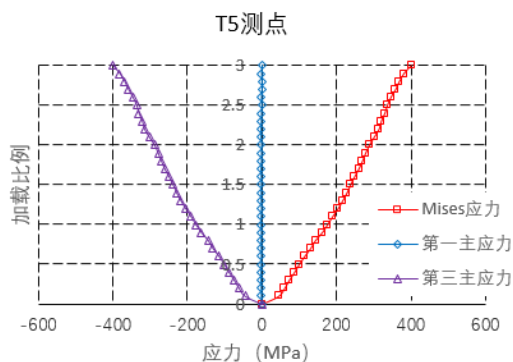
(b) T2 测点加载比例-应力曲线



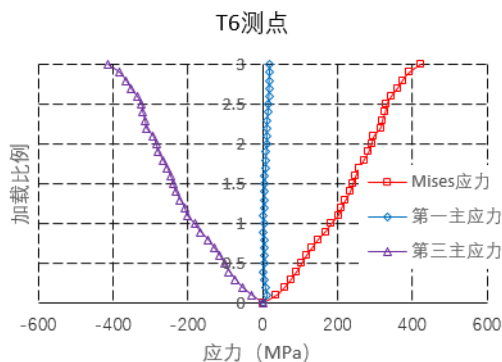
(c) T3 测点加载比例-应力曲线



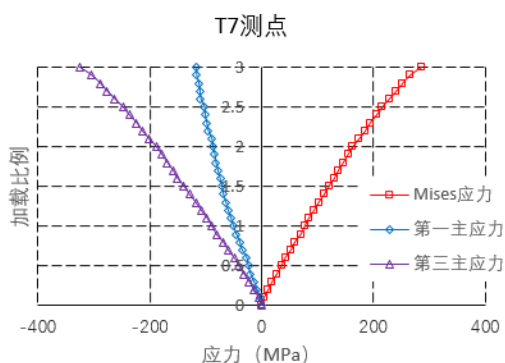
(d) T4 测点加载比例-应力曲线



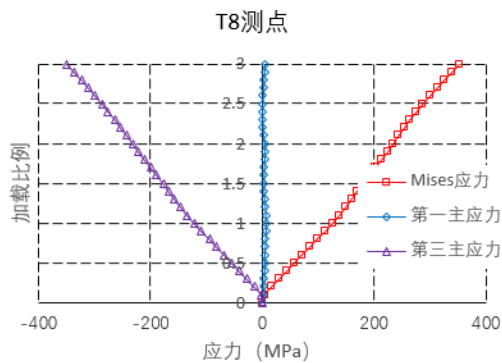
(e) T5 测点加载比例-应力曲线



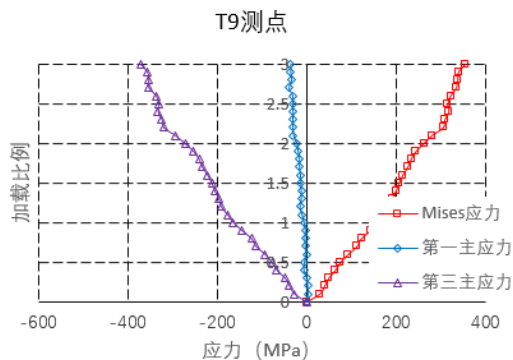
(f) T6 测点加载比例-应力曲线



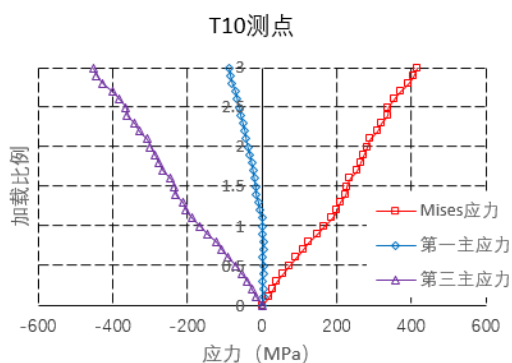
(g) T7 测点加载比例-应力曲线



(h) T8 测点加载比例-应力曲线



(i) T9 测点加载比例-应力曲线



(j) T10 测点加载比例-应力曲线

图 3.4.1 ZGJ-3-15Q 节点各个测点处三向片的加载比例-应力变化曲线

从图 3.4.1 中可以看到，试验加载至 1.0 倍设计荷载时，节点区域所有三向应变片测点的应变数据均处于弹性范围内，应变最大值出现在 28008、37071 以及 37155 三根杆件交汇区的 28008 号杆件上，该区域测点的等效 Mises 应力为 197MPa (T1 测点)。加载至 2.0 倍设计荷载时，节点区域所有三向应变片测点的应变数据仍处于弹性范围内，应变最大值位于 28008 号杆件上的 T2 测点处，等效 Mises 应力最大值为 310MPa (T2 测点)。试验加载至 3.0 倍设计荷载时，有 3

个测点(T2、T6、T10 测点)应力超过了材性试验所测的平均屈服强度 415MPa,其等效应变分别为 2670 微应变、2261 微应变、2192 微应变(T2、T6、T10 测点处,相应的等效 Mises 应力分别为 478MPa、423MPa、416MPa)。

在 10 个三向片测点中, T2、T6、T10 测点处的应力超过了材性试验所测的平均屈服强度 415MPa(即进入了塑性), T1、T5 测点处应力超过了 400MPa, 其余测点处(尤其是 T8、T9 测点处)应力水平也很高。这是由于这些测点一方面处于多根杆件交汇区,在交汇区出现了一定程度的应力集中(T1、T5、T6、T8、T9 测点);另一方面这些测点处于压弯作用叠加处(T1、T2、T5、T6、T8、T9、T10 测点);此外,在 28008 号杆件靠近固定端方向由于较大的剪力产生了较大的弯矩导致应力水平很高(T2、T10 测点)。

综上所述,在 3.0 倍设计荷载作用下,铸钢节点 ZGJ-3-15Q 有 3 个测点(T2、T6、T10 测点)进入塑性状态,且其余测点处(尤其是 T1、T5、T8、T9 测点)应力水平也很高,节点进入塑性状态。

## 4 有限元分析

根据《铸钢节点应用技术规程》(CECS235:2008)第 4.4.8 条规定,铸钢节点试验必须辅以有限元分析和对比,此次试验研究利用 ABAQUS 有限元分析软件对铸钢节点进行有限元分析,并与试验结果进行对比。

本试验涉及的铸钢节点几何造型独特,即使在弹性受力阶段,其应力状态也较为复杂。同时,由于试验布置的测点数量有限,测点位置的选择也受到制约,很难仅仅通过试验全方位了解节点的受力性能。因此,有限单元法作为从整体把握节点力学性能的重要手段之一,是试验研究的重要补充。

### 4.1 计算模型

#### 4.1.1 几何模型和边界条件

采用有限元软件 Abaqus 6.13 对试件进行弹塑性有限元分析。本节点有限元分析的几何模型基于中南建筑设计院提供的铸钢节点 CAD 三维实体模型,并根据试验实际情况加设接管,用于传递轴力和弯矩等外荷载。

考虑试验的实际加载边界,数值模拟过程中节点采用一端为固定约束,其余全部自由的边界条件。几何模型如图 4.1.1 所示。

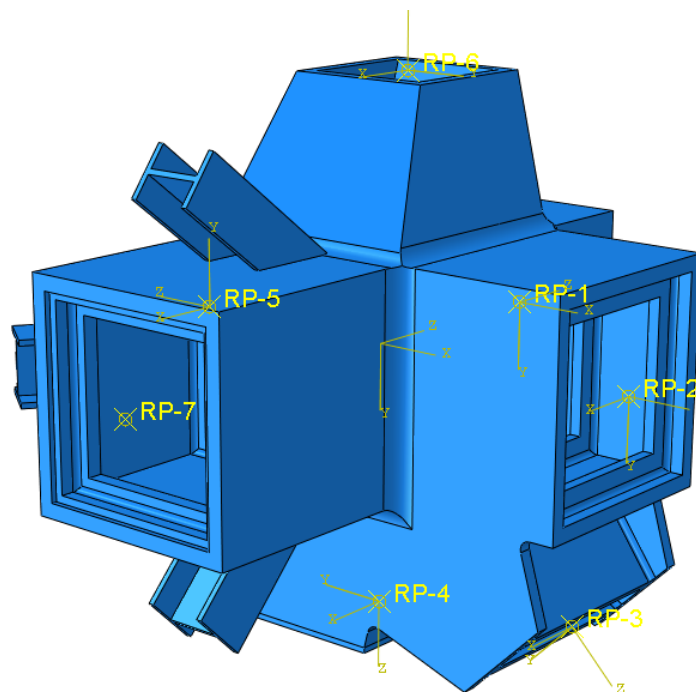


图 4.1.1 ZGJ-3-15Q 节点有限元模型

#### 4.1.2 加载方式

有限元分析的加载方式一般分为位移加载和力加载两类。考虑到节点试验中

采用力加载的方式，为了方便对比试验和有限元分析结果，本试验有限元分析过程中也采用力加载方式。各支管端部均根据实际加载工况建立相应的局部坐标系，在局部坐标下施加轴力和弯矩。所施加的荷载与试验荷载完全相同，荷载形式为从零线性增加到最大值。在建模时，首先在各管件截面中心处分别设置参考点，并使这些参考点与相应的管端截面相约束，在此参考点处施加集中荷载。

#### 4.1.3 材性选择

铸钢材料采用双折线模型，其材性参数取自 3.1 节的材性试验结果。

#### 4.1.4 单元选择

本节点有限元模型采用实体单元，由于铸钢节点几何构型复杂，因此本节点模型采用四面体单元 C3D10，该单元适用于 ABAQUS/Standard 中的小位移无接触问题。同时，在保证铸钢节点厚度方向有足够的单元数的前提下，考虑计算成本，选择单元尺寸为 20mm。

#### 4.1.5 几何非线性

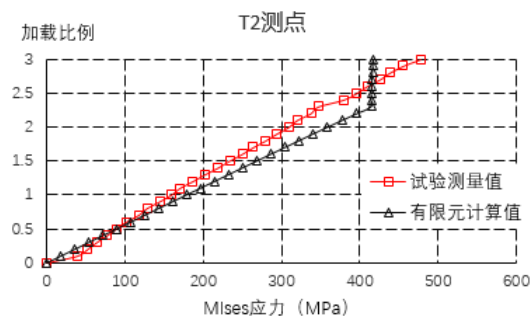
当节点出现较大变形时，小变形条件下的几何方程平衡条件将不再适用。因此，有限元分析宜考虑几何非线性的影响。本节点在进行分析步设置时，选择软件中自带的 `nonlinear` 选项，即考虑几何非线性的影响。

### 4.2 有限元分析结果

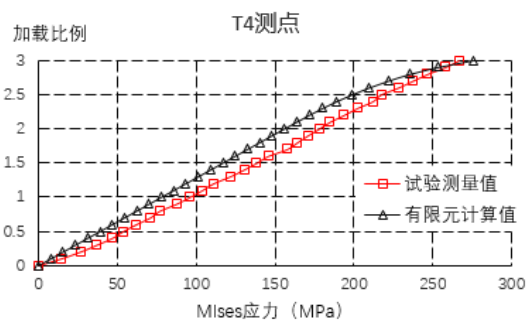
关键测点处的 Mises 应力试验测试值和有限元计算值对比如图 4.2.1 所示。需要说明的是，试验测点处的 Mises 应力由铸钢件表面的三向应变片（三个应变分量）的应变值求得（ $\sigma_{m3}$ ），而非由空间一点的应变分量求得；而有限元分析得到的 Mises 应力为测点对应单元的 6 个空间应变分量的计算值（ $\sigma_{m6}$ ），两者有一定的差别。一般的， $\sigma_{m3}$  和  $\sigma_{m6}$  差别不大，可采用  $\sigma_{m6}$  与试验值进行对比。

从图 4.2.1 来看，有限元分析结果和试验测试结果总体上吻合良好。不完全吻合的原因有两个方面：一方面，在有限元建模时，材料定义为无残余应力的均质材料，且无几何缺陷，而铸钢件在浇铸过程中，可能会产生疏松以及残余应力等物理缺陷和几何缺陷；另一方面，有限元建模采用的三维模型和试验试件存在着差异，特别是处于倒角区域的测点。

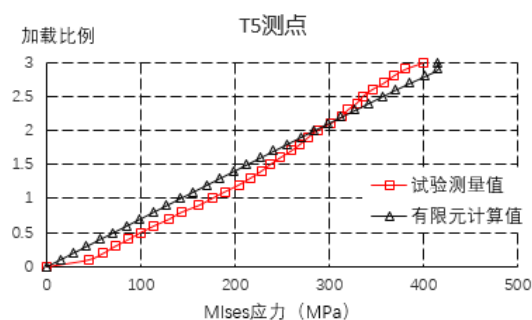




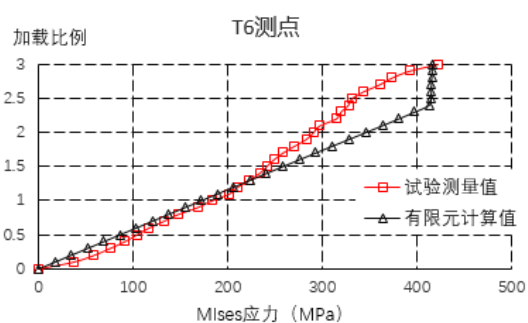
(a) T2 测点试验值与有限元对比图



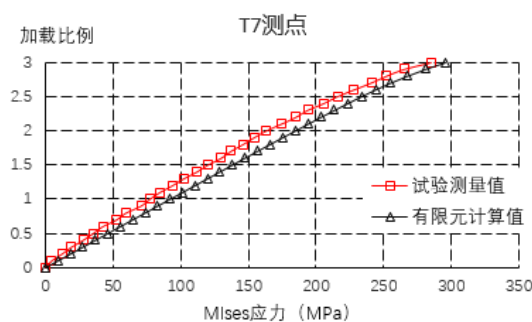
(b) T4 测点试验值与有限元对比图



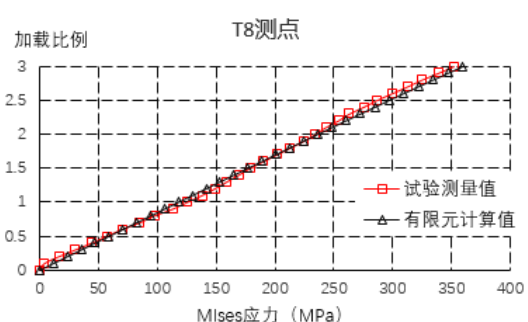
(c) T5 测点试验值与有限元对比图



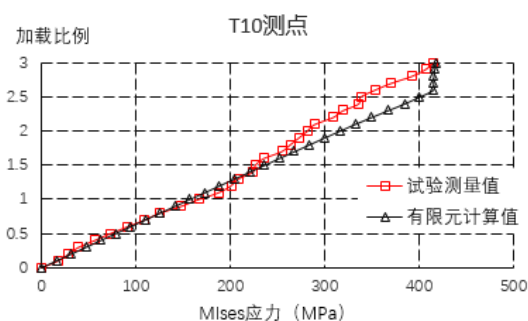
(d) T6 测点试验值与有限元对比图



(e) T7 测点试验值与有限元对比图



(f) T8 测点试验值与有限元对比图



(g) T10 测点试验值与有限元对比图

图 4.2.1 ZGJ-3-15Q 节点各个测点试验值与有限元对比图

铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 2.0 倍设计荷载时，节点 Mises 应力云图如图 4.2.2 至图 4.2.4 所示。

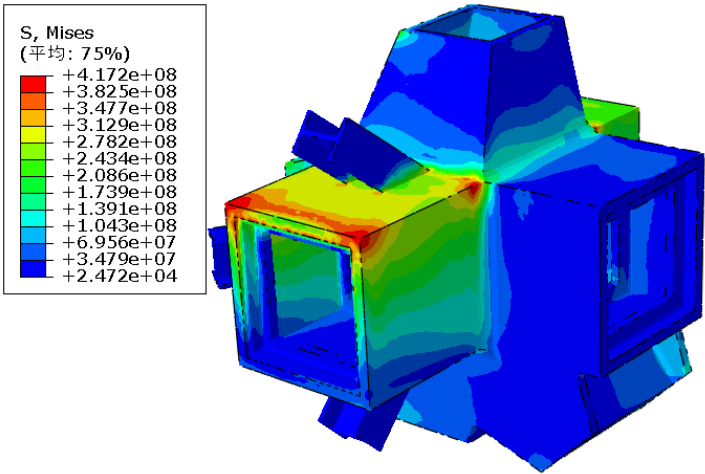


图 4.2.2 2.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 A

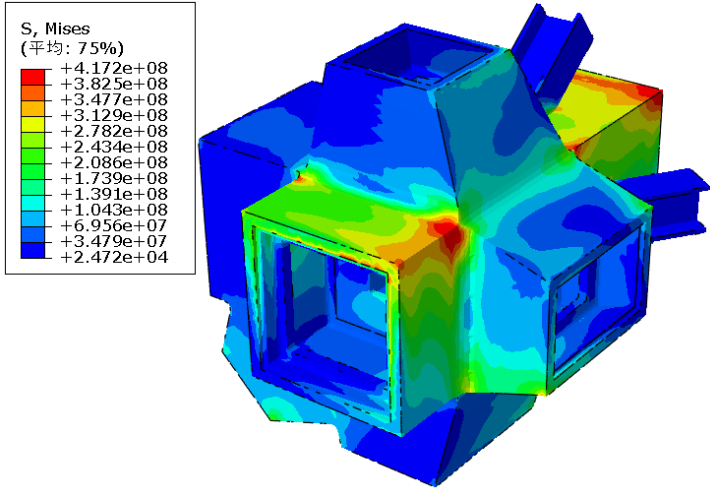


图 4.2.3 2.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 B

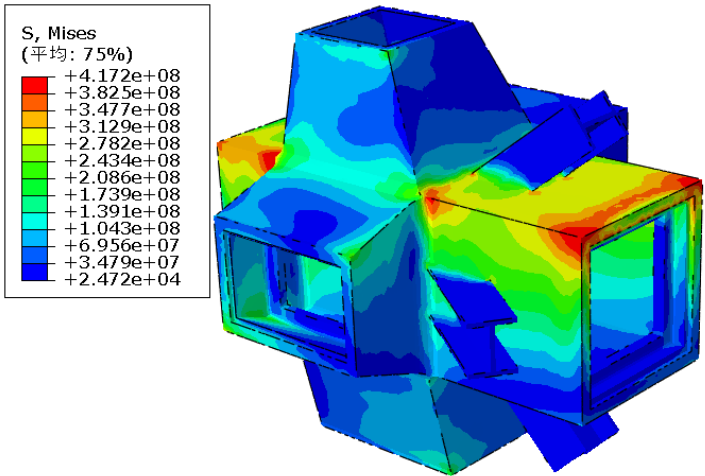


图 4.2.4 2.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 C

铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 3.0 倍设计荷载时，节点 Mises 应力云图如图 4.2.5 至图 4.2.7 所示。

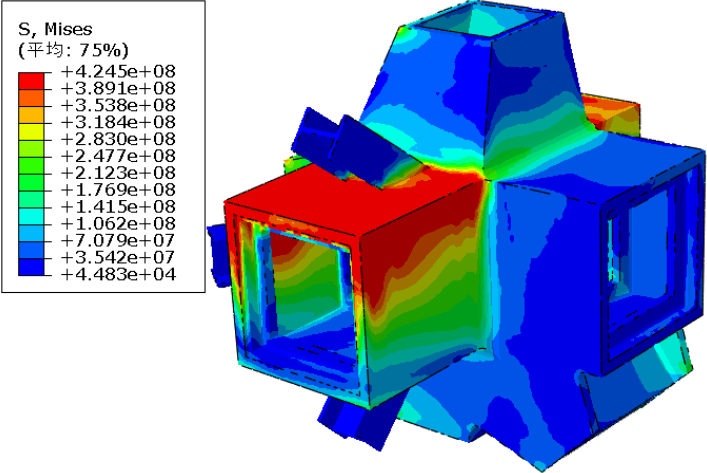


图 4.2.5 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 A

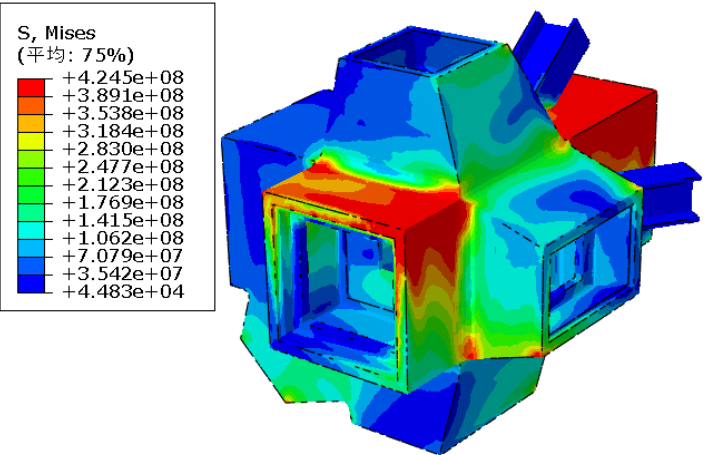


图 4.2.6 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 B

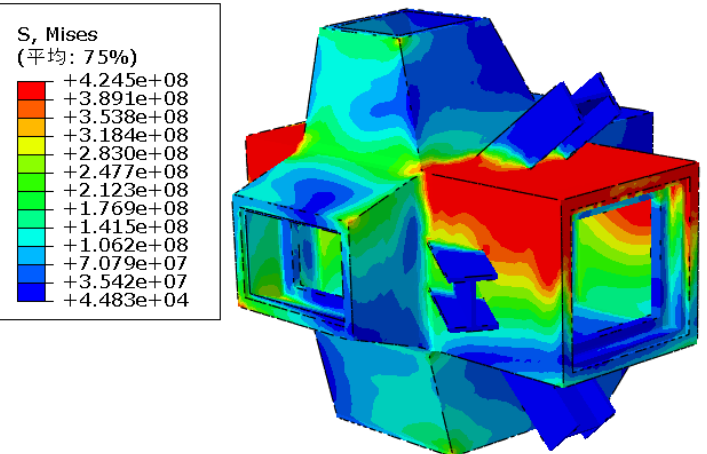


图 4.2.7 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 C

铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 3.0 倍设计荷载时，节点在两个方向剖切后的内部 Mises 应力云图如图 4.2.8 和图 4.2.9 所示。

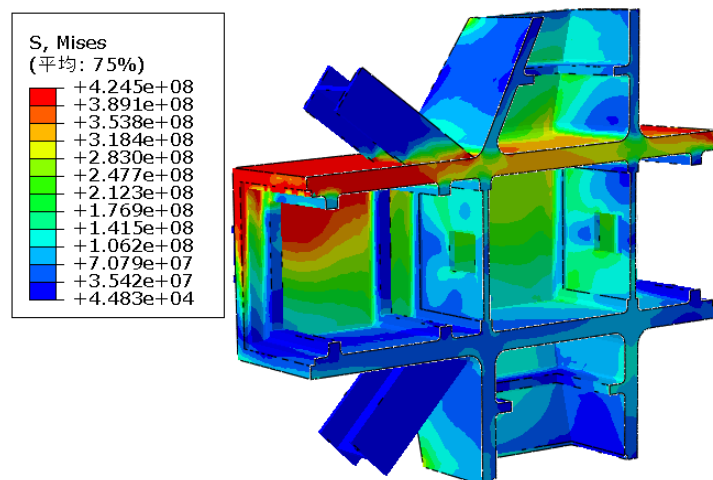


图 4.2.8 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点内部 Mises 应力云图 A

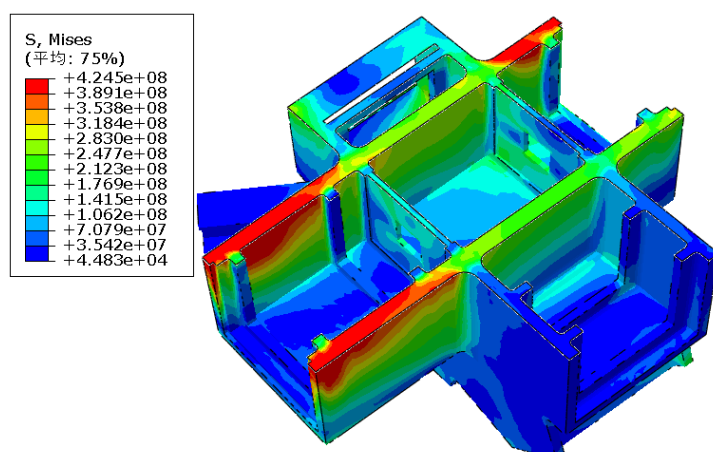


图 4.2.9 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点内部 Mises 应力云图 B

由图 4.2.2 至 4.2.4 中可以看出，ZGJ-3-15Q 节点在 2.0 倍设计荷载作用下，在 28008 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 28008 号杆件角部、在 40668 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 40668 号杆件角部以及在 28008 号杆件靠近固定端方向的根部，由于应力集中而导致 28008 号杆件角部、根部以及 40668 号杆件角部的很小一部分区域 Mises 应力达到了材性试验所测的平均屈服强度 415MPa（即进入了塑性）；而其余杆件的 Mises 应力水平较低。可见，在 2.0 倍设计荷载作用下 ZGJ-3-15Q 节点仅个别区域进入塑性，节点的整体行为仍呈弹性特征。

由图 4.2.5 至 4.2.7 中可以看出，ZGJ-3-15Q 节点在 3.0 倍设计荷载作用下，在 28008 号杆件的上侧面板件、右侧面板件（图 4.2.5 所示 28008 号杆件上侧面、右侧面）以及左侧面板件（图 4.2.7 所示 28008 号杆件左侧面），在 40668 号杆件的上侧面板件、右侧面板件（图 4.2.6 所示 40668 号杆件上侧面、右侧面），均有

大部分区域 Mises 应力达到了材性试验所测的平均屈服强度 415MPa（即进入了塑性）；其余部位均处于弹性状态。

由图 4.2.8 至 4.2.9 可以看出,ZGJ-3-15Q 节点内部在 3.0 倍设计荷载作用下,在 28008 号杆件内部有一大部分区域进入塑性,在 40668 号杆件内部有小部分区域进入塑性,其余节点内部应力均处于弹性状态。

同时,在 40668 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 40668 号杆件上选取了进入屈服的点 1 和点 2,在 28008 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 28008 号杆件上选取了进入屈服的点 3 和点 4,并作出其加载比例-位移曲线及加载比例-等效塑性应变曲线,如图 4.2.10 所示。可以看出,从 2.7 倍设计荷载开始,选取的 4 个屈服点位移不再呈线性发展,且点 1 和点 2 位移大于点 3 和点 4,在 3.0 倍设计荷载时点 1 和点 2 的位移达到了 3.9mm;而等效塑性应变则为点 3>点 1>点 4>点 2,在 3.0 倍设计荷载时点 3 的等效塑性应变达到了 1187 微应变。

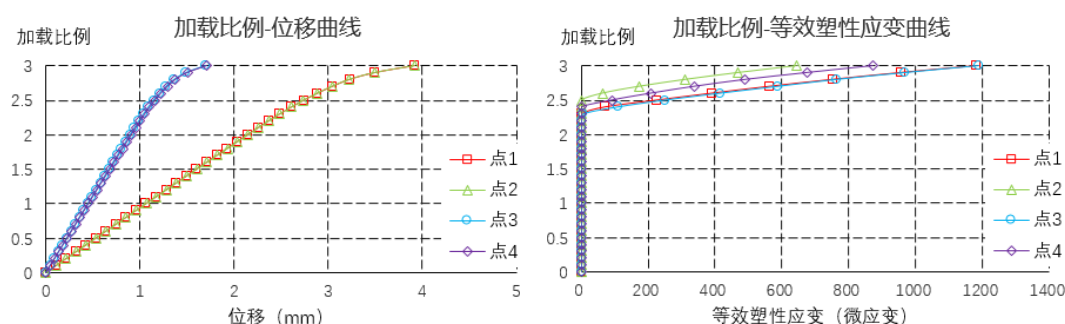


图 4.2.10 加载比例-位移曲线及加载比例-等效塑性应变曲线

有限元分析结果表明,在采用实测的铸钢材料性能指标条件下,铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 2.0 倍设计荷载作用下仅个别区域进入塑性,节点的整体行为仍呈弹性特征;在 3.0 倍设计荷载作用下,有大部分区域进入塑性状态,且从 2.7 倍设计荷载开始,节点整体和局部位移已经不再呈线性发展,但节点的极限承载力可达到设计荷载的 3.0 倍。

### 4.3 有限元分析结果（基于规范规定的材性参数）

基于实测的铸钢材料性能参数,4.2 节给出了相应的有限元分析结果。考虑到实测的铸钢材料屈服强度达 415MPa,远高于规范规定（厂家提供）的铸钢材料屈服强度（340 MPa）;因此,本节根据表 1.1.1 中给出的铸钢 ZG340-550H 的材性参数,再次进行有限元分析,以得出此时铸钢节点的受力性能。

铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 2.0 倍设计荷载时,节点 Mises 应力云图如图 4.3.1 至图 4.3.3 所示。

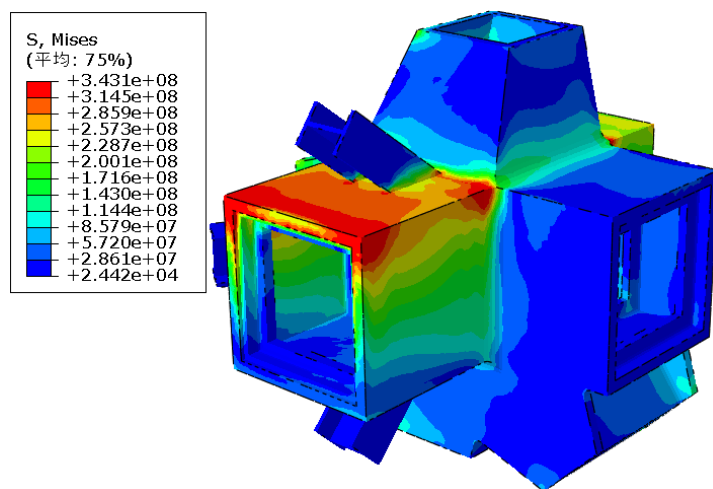


图 4.3.1 2.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 A

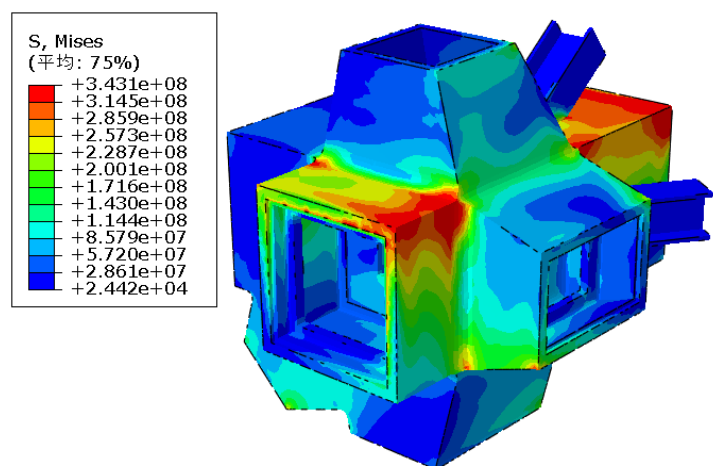


图 4.3.2 2.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 B

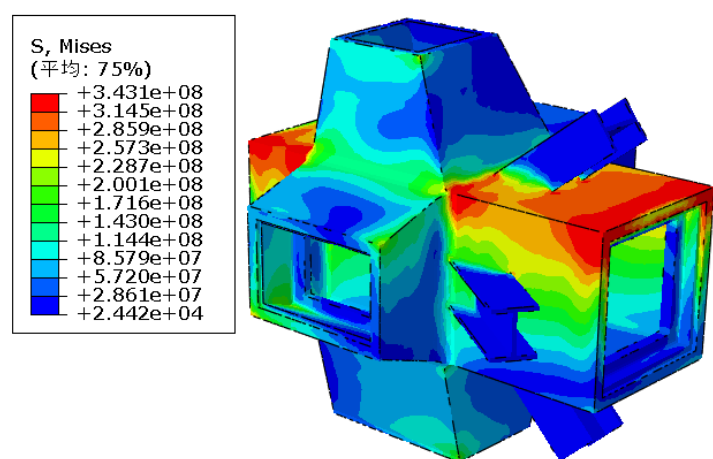


图 4.3.3 2.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 C

铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 3.0 倍设计荷载时，节点 Mises 应力云图如图 4.3.4 至图 4.3.6 所示。

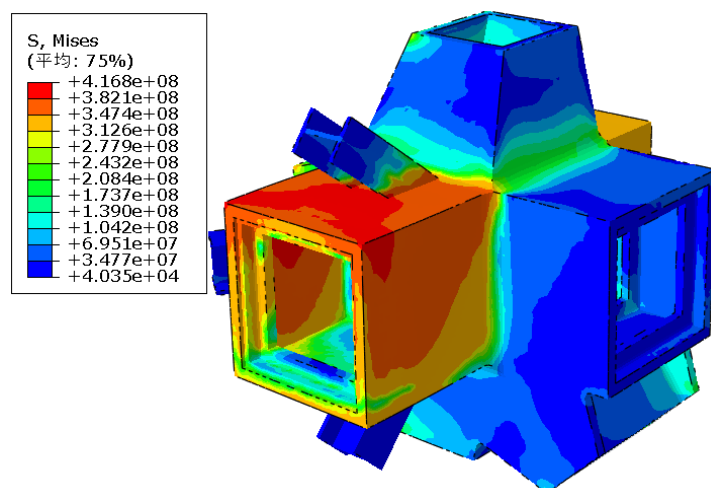


图 4.3.4 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 A

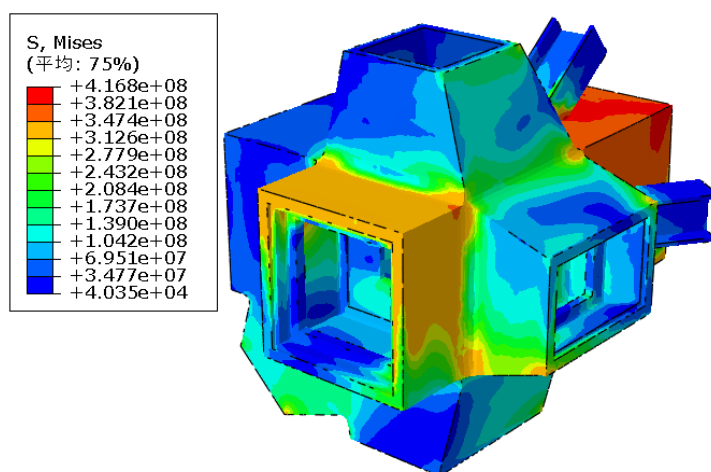


图 4.3.5 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 B

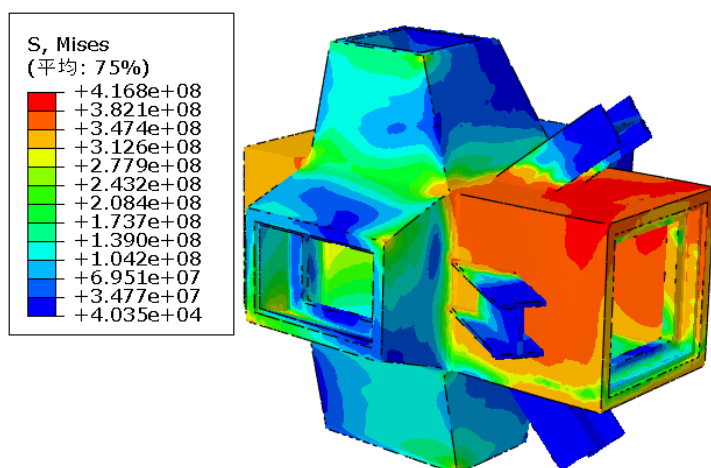


图 4.3.6 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点 Mises 应力云图 C

铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 3.0 倍设计荷载时，节点在两个方向剖切后的内部 Mises 应力云图如图 4.3.7 和图 4.3.8 所示。



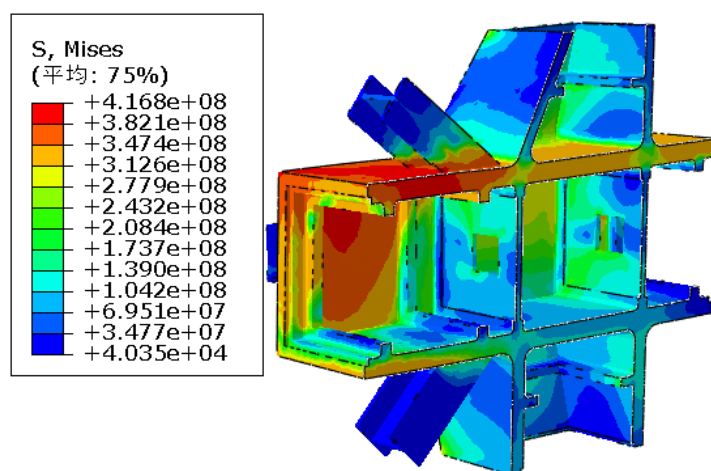


图 4.3.7 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点内部 Mises 应力云图 A

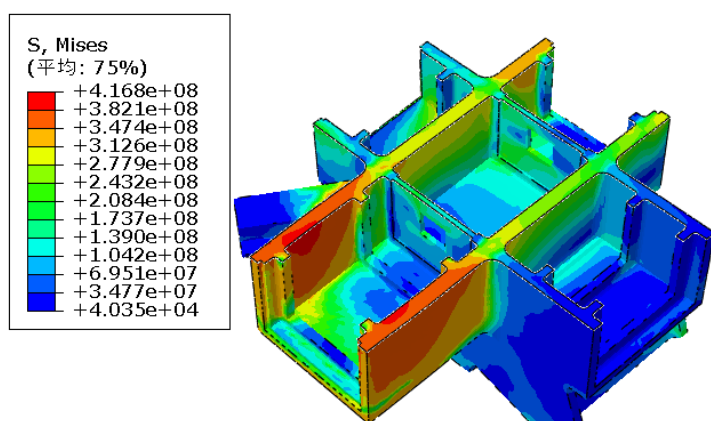


图 4.3.8 3.0 倍设计荷载下 ZGJ-3-15Q 节点内部 Mises 应力云图 B

由图 4.3.1 至 4.3.3 中可以看出，ZGJ-3-15Q 节点在 2.0 倍设计荷载作用下，在 28008 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 28008 号杆件角部、在 40668 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 40668 号杆件角部以及在 28008 号杆件靠近固定端方向的根部的一部分区域 Mises 应力达到了屈服强度 340MPa（即进入了塑性），其余部位仍处于弹性状态。可见，在 2.0 倍设计荷载作用下 ZGJ-3-15Q 节点有一部分区域进入塑性，节点整体行为仍呈线性发展。

由图 4.3.4 至 4.3.6 中可以看出，ZGJ-3-15Q 节点在 3.0 倍设计荷载作用下，在 28008 号杆件的上侧面板件、右侧面板件（图 4.3.4 所示 28008 号杆件上侧面、右侧面）以及左侧面板件（图 4.3.6 所示 28008 号杆件左侧面），在 40668 号杆件的上侧面板件、右侧面板件（图 4.3.5 所示 40668 号杆件上侧面、右侧面），几乎整个侧面板件区域 Mises 应力达到了 340MPa（即整个侧面板件区域进入了塑性）；其余杆件均处于弹性状态。

由图 4.3.7 至 4.3.8 中可以看出，ZGJ-3-15Q 节点内部在 3.0 倍设计荷载作用



下，在 28008 号杆件内部有很大一部分区域进入塑性，在 40668 号杆件内部有少部分区域进入塑性，其余节点内部应力均处于弹性状态。

同时，在 40668 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 40668 号杆件上选取了进入屈服的点 1 和点 2，在 28008 号杆件与 37071 号杆件交汇区的 28008 号杆件上选取了进入屈服的点 3 和点 4，并作出其加载比例-位移曲线及加载比例-等效塑性应变曲线，如图 4.3.9 所示。可以看出，从 2.4 倍设计荷载开始，选取的 4 个屈服点位移不再呈线性发展，且点 1 和点 2 位移大于点 3 和点 4，在 3.0 倍设计荷载时点 1 和点 2 的位移达到了 30mm，此时节点已经出现了大变形；而等效塑性应变则为点 3>点 4>点 1>点 2，在 3.0 倍设计荷载时点 3 的等效塑性应变达到了 18343 微应变。

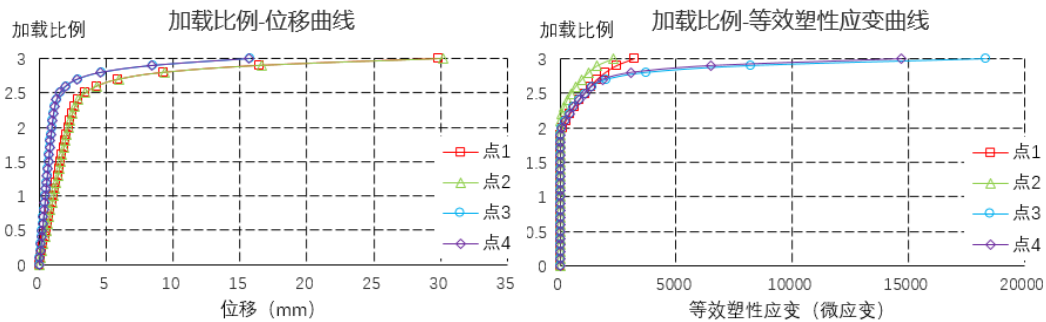


图 4.3.9 加载比例-位移曲线及加载比例-等效塑性应变曲线

综上所述，在 3.0 倍设计荷载作用下，铸钢节点 ZGJ-3-15Q 有很大一部分区域进入塑性状态。

采用规范规定的材性数据进行的有限元分析结果表明，铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 2.0 倍设计荷载作用下有一部分区域进入塑性，节点整体行为仍呈线性发展；在 3.0 倍设计荷载作用下，有很大一部分区域进入塑性状态，且从 2.4 倍设计荷载开始，节点整体和局部位移已经不再呈线性发展，节点的极限承载力接近于设计荷载的 3.0 倍。

## 5 结论

本试验对湖北科技馆铸钢节点 ZGJ-3-15Q 进行了缩尺比例为 1:2.5 的模型静力加载试验，得到如下结论：

(1) 本缩尺试验在节点的加载力系确定、荷载施加、边界条件等方面与实际节点的工作状况一致，试验数据测量完整、准确，试验结果可反映节点在实际工况下的响应。

(2) 试验加载至 2.0 倍设计荷载时，铸钢节点中所有应变测点始终处于弹性状态，节点应力最大值出现在 28008 号杆件上的 T2 测点处，等效 Mises 应力最大值为 310MPa (T2 测点)。试验加载至 3.0 倍设计荷载时，有 3 个测点 (T2、T6、T10 测点) 应力超过了材性试验所测的平均屈服强度 415MPa，且其余测点处 (尤其是 T1、T5、T8、T9 测点) 应力水平也很高，部分节点区域进入塑性状态。可见，铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在监控的测点范围内，在设计荷载作用下是安全的，且具有一定的安全储备。

(3) 有限元分析结果表明，铸钢节点 ZGJ-3-15Q 在 2.0 倍设计荷载作用下，如采用实测材料强度，节点仅在个别区域进入塑性，节点的整体行为仍呈弹性特征；如采用规范规定的材料强度，节点有一部分区域进入塑性，节点整体行为仍呈线性发展。在 3.0 倍设计荷载作用下，如采用实测材料强度，节点有大部分区域进入塑性状态，且从 2.7 倍设计荷载开始，节点整体和局部位移已经不再呈线性发展；如采用规范规定的材料强度，节点有很大一部分区域进入塑性状态，且从 2.4 倍设计荷载开始，节点整体和局部位移已经不再呈线性发展。

根据《铸钢节点应用技术规程》(CECS235:2008)规定，铸钢节点 ZGJ-3-15Q 的试验破坏承载力不小于荷载设计值的 2 倍，弹塑性有限元分析所得的极限承载力大于 (实测材性) 或接近于 (规范材性) 荷载设计值的 3 倍，节点整体上是安全的。