



深圳大运中心体育馆铸钢节点构造选型和模型试验研究

王帆¹, 吴波², 黄仕香², 赵新宇², 罗敏¹, 隋庆海³

(1. 华南理工大学 建筑设计研究院, 广东广州 510640;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东广州 510640;

3. 中国建筑东北设计研究院深圳分院, 广东深圳 518000)

摘要:结合深圳大运中心体育馆大跨度钢结构关键连接节点,对铸钢节点的构造选型进行了设计。根据原型节点的受力特点,设计制作了1:2的节点模型及其加载装置,并且进行了静力加载试验,对节点各分支杆件的应力状况和变形进行了测试。试验结果表明:在1.3倍设计荷载作用下,节点大部分区域处于弹性受力状态,节点杆件的转角和位移很小,说明该节点在承载力和刚度方面能够满足安全性和适用性要求;位于节点中轴面上的杆件连接耳板和销轴受压偏斜变形,为此提出了改进构造的措施——将杆件耳板直接顶压在节点区域,销轴不是用作抗剪构件而仅作为限位构件。将试验结果与有限元分析结果进行对比,结果符合较好。结合本研究针对铸钢节点的研究、设计制造、材质检验提出了建议。

关键词:铸钢节点;模型试验;有限元分析;构造选型

中图分类号:TU393.3 TU317.1 文献标志码:A

Research on structure selection and model test of cast-steel joint used in the Gymnasium of Shenzhen Universiade Sport Center

WANG Fan¹, WU Bo², HUANG Shixiang², ZHAO Xinyu², LUO Min¹, SUI Qinghai³

(1. Architecture Design & Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. China Northeast Architectural Design & Research Institute Shenzhen Branch, Shenzhen 518000, China)

Abstract: For designing the key joints of large-span steel structure in the Gymnasium of Shenzhen Universiade Sport Center, a study on the structure selection of cast-steel joint was carried out. According to the load characteristics of the prototype joint, a 1:2 model and its loading device were made. By carrying out static loading test on the model, the stress condition and deformation of the joint was experimentally examined. Results of the experiment and analysis show that even if the test load reaches 1.3 times the design load, most parts of the joint remain elastic with little deformation, indicating the satisfaction of the joint design for requirement of safety and applicability. The connection plate and pin in the joint axis surface were deformed by the pressure, thus enhancement measures were taken press the plate on the joint directly, then the pin is used as a space limiting element not a shear resistant. It is further shown that testing and FEM analysis results are compared favorably. Proposal about the study, design and manufacture, materials inspection of the cast-steel joints was put forward combining with this research.

Keywords: cast-steel joint; model test; finite element analysis; structure selection

作者简介:王帆(1971—),男,四川成都人,工学博士,副教授,一级注册结构工程师。E-mail:wangfan@scut.edu.cn

通讯作者:罗敏(1986—),女,湖南长沙人,硕士研究生。E-mail:luomin0500@yahoo.com.cn

收稿日期:2009年9月

0 试验研究背景

大跨度空间结构的节点受力大、构造复杂,节点设计合理与否对结构的整体性能、制作安装、工程造价等都有较大的影响。随着计算技术与铸造工艺的发展,铸钢为建筑节点提供了一种新的选择。

和焊接节点相比,铸钢节点具有以下优点:①可以在铸造厂内整体浇铸,工序的最后还要经过正火和表面调质,所以相对焊接钢管相贯节点而言,可免去重叠焊缝引起的应力集中,也减少了相贯线切割的麻烦;②铸钢节点造型设计的自由度大,可根据受力状况和浇铸工艺合理调节壁厚和倒角,避免因相贯夹角过小导致的连接困难和应力集中;③由于壁厚比焊接节点大并且可以在相贯线处倒角,所以铸钢节点承载能力大,也可以因此减小其外部尺寸。

铸钢节点的主要缺点:①铸造材料均质性较差,甚至有可能出现较大裂纹;②由于壁厚较大,铸钢节点一般都很重,用作空间结构的节点对整体结构的刚度和承载力影响大;③材料单价高于轧制钢板,而且铸钢节点用钢量大,所以采用铸钢节点的材料总花费高于焊接节点;④由于壁厚太大,不易检验其内部缺陷。一般超声波探伤只能用于40mm以下厚度管壁,大型X光机可以探测更厚的板有没有缺陷,但不能给缺陷处于什么深度定位。⑤从制造方面来说,目前积极参与制作和研发建筑铸钢节点的厂家不多,有些生产设备较简陋,其产品难以满足越来越高的设计要求。不管是浇铸的质量还是制作的精度都需要有大幅度的提高。

深圳大运中心由一场两馆组成,其屋盖和幕墙的主结构均采用“单层折面空间网格结构”,该结构的特点为虚构面(波峰点连续化表面与波谷点连续化表面之间的中轴面)外刚度很大,而虚构面内刚度很小,且没有赘余杆件。为了保证结构具有可靠的

整体工作性能,要求节点具有足够的承载力和刚度,不能先于构件破坏。

经比较研究,深圳大运中心工程大部分钢结构节点采用铸钢节点,本文即选取体育馆结构中汇交杆件数量最多的节点——肩谷点进行研究。首先进行设计选型,在此基础上进行模型试验研究,从试验和计算两方面入手,研究节点在静力作用下的刚度和强度等性能,掌握该类型节点在特定外力条件作用下的工作性能,从而为施工图设计提供依据。

1 节点选型分析

体育馆主结构由16个基本结构单元沿环向布置组拼而成,肩谷点位于屋盖和幕墙主结构的汇交处(图1),初步设计时该节点共汇交了8根杆件,扩初设计时整体计算模型调整,增加了16L和16R两根拉杆,汇交杆件增加到10根,是大运中心钢结构工程中汇交杆件最多、受力最复杂的节点之一。12、13号杆形成节点的中轴面与水平面垂直,编号前缀为4、6、8、16的杆件均为2根,并关于该中轴面左右对称设置。16L、16R号杆件位于水平面上。

最初的设计方案中,主结构杆件均为焊接矩形钢管,所以汇交的节点就是矩形方管相贯节点,图2所示为当时设计的节点构造和组拼顺序。因为6号杆件内力较大,所以在这个方案中以6L、6R杆先行组成节点核心域(图2a),其上下翼缘分别为一块整板加工而成;第二步4L、4R杆先后和节点核心域相贯焊接(图2b、2c);8L、8R与12号杆为第三步安装的杆件(图2d);最后组拼13号杆(图2e)。

用钢板组焊成节点有造型灵活的优点,相贯线位于矩形钢管的棱边可以加大节点的承载力和刚度。但是焊接量大,焊接残余变形和应力难以消除。另外,矩形钢管空间角度多且复杂,节点加工时如果截面稍有扭转,就会给安装带来很多的麻烦。

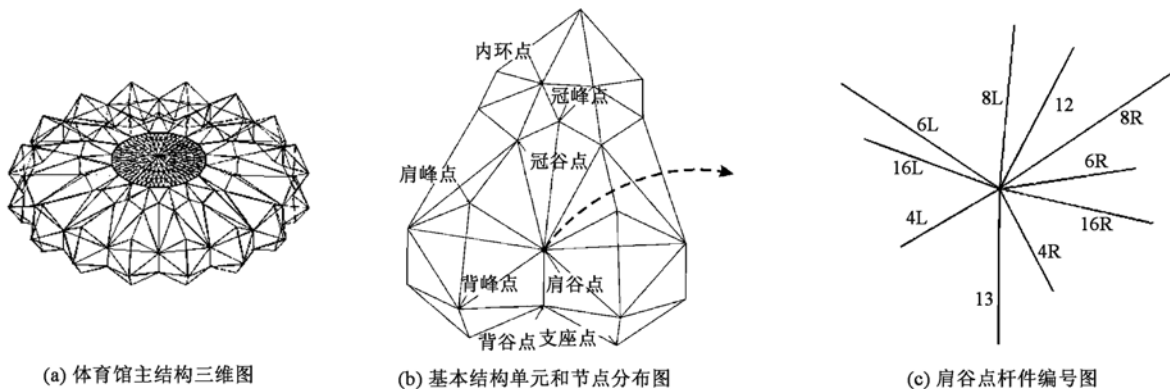


图1 体育馆主结构及肩谷点杆件编号

Fig. 1 Stadium main structure and shoulder-valley joint members

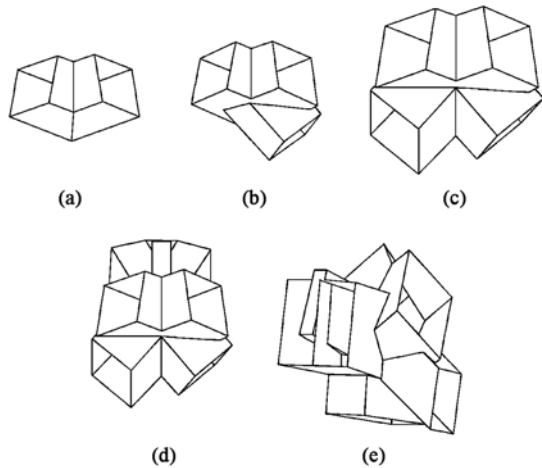


图2 采用焊接矩形方管的构造和组拼顺序
Fig. 2 Program of using welding rectangular pipe

圆钢管就不存在截面扭转影响安装的问题, 所以将杆件截面改为圆钢管。在杆件汇交的区域, 首先考虑把圆钢管以一定的次序依次相贯形成节点, 为了保证节点的刚度和焊接的方便, 在节点核心区设置插板, 圆管开槽和切割相贯线后以一定的次序焊接组拼成为肩谷点。图3为该方案的插板构造、钢管组拼方案以及节点装配好后的三维效果图。

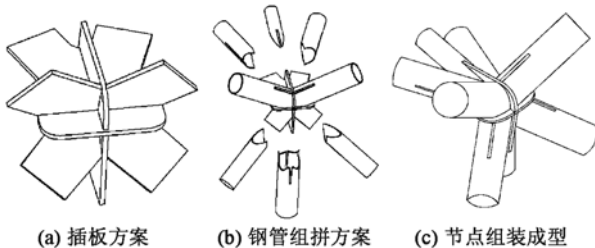


图3 采用插板的圆管相贯焊接方案
Fig. 3 Program of using intersecting flashboard welding pipe

后来体育馆结构整体模型中增加了一道环箍以增强结构的整体性。环箍将16个基本结构单元的肩谷点连接在一起, 这样肩谷点汇交的杆件数量达到10根。由于各杆件内力都很大, 而建筑设计对杆件截面外轮廓的大小有一定限制, 所以需要采用厚壁钢管, 这就给节点制造时的焊接带来很大困难。为了避免巨大的焊接工作量, 考虑采用铸钢节点方案。图4为先后设计的3个铸钢肩谷点的形式。

图4a为内肋式节点方案, 以13号杆贯通作为核心, 其内部铸造出3道环向加劲肋和4道纵向加劲肋, 其余杆件与它相贯连接。16号杆设计为带U形铸造接头的两道平行的拉杆, 通过插销和耳板与节点连接。

图4b为非贯通型的铸钢节点方案, 12号杆改为铰接, 所以在节点区域将其改为铸造钢板。16号杆

改为带U形铸造索头的单根拉索。节点内部为实心, 从管口向内掏出椭球体形状的空腔。为了方便在节点之间安装杆件, 管口设计为台阶形。

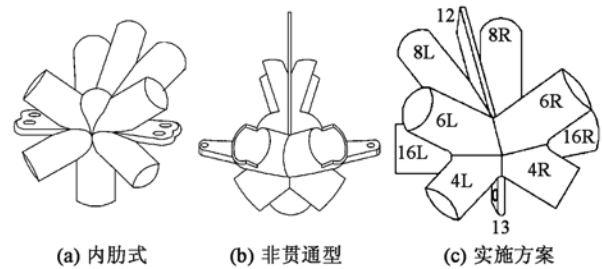


图4 肩谷点的铸钢形式方案

Fig. 4 Program of shoulder-valley joint cast-steel

图4c在图4b的基础上做了一些改动: ①为了释放13号杆的弯矩, 将其上端改为铰接, 所以在节点区域设计为带销孔的铸钢板。12、13号杆的接头均为铸钢板, 位于同一竖直面上, 形成本节点的中轴面。②16号杆改为钢管, 和其它杆件一起铸造。由于16号杆的最大设计拉力达到21287kN, 所以左右两侧的16L和16R号杆直接与中轴面连接。③4、6、8号杆件与12、13、16号杆组成核心相贯。该节点仍为非贯通型, 管口向内掏出椭球体形状的空腔, 空腔的大小依靠计算分析结果并结合制作工艺来确定。

最终选择图4c所示的节点形式为实施方案。

2 节点设计与理论分析

2.1 铸钢材料

铸钢材料的化学成分和机械强度是选材时比较关注的两个问题。由于杆件材质为Q345和Q390, 所以铸钢节点的材料强度应尽可能与其相当, 化学成分也要接近, 以保证焊接质量和连接的可靠。GB 50017—2003《钢结构设计规范》^[1]给出了4种建议采用的钢铸件材料, 其中ZG310-570强度最高, 抗拉、抗压和抗弯强度设计值 $f = 240\text{MPa}$ 。CECS 235:2008《铸钢节点应用技术规程》^[2](注: 本项目进行期间该规程为报批稿)规定: 可焊铸钢件材料, 对于承受静力荷载或间接动力荷载, 多管节点、三向受力等复杂受力状态下的铸钢节点, 可选择ZG 275-485H、SCW 480(日本标准(JISC 5102-1991))、SCW 550、G20Mn5N(德国标准(DIN EN 10293、DIN EN 10213-1:1996、DIN EN 10213-3:1996))。同时又规定: 当节点受力较复杂、受直接动力荷载或处于7度及以上抗震设防区域时, 宜选用G17Mn5QT、G20Mn5N、G20Mn5QT铸钢。

本项目采用德国标准的焊接结构用低合金铸钢G20Mn5, 并且要求进行调质处理。德国标准中对钢

材残余元素 S、P 的含量要求比较严格,控制在 0.02% 以下。其化学成分和机械性能见表 1、2。严格限制 C、S、P 的含量不仅使铸钢件具有良好的塑性与韧性,而且可以确保节点的焊接性。

对于塑性性能良好的铸钢材料,处于三向应力状态下的节点可采用 von Mises 屈服准则为设计依据:当计算点的等效应力超过材料的屈服强度,即认为该点进入塑性。

$$\sigma_{eq} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq f_y$$

式中, σ_{eq} 为等效应力, f_y 为铸钢材料屈服强度。

另一方面,考虑到铸造过程中可能产生的内部缺陷,为避免三向应力状态下钢材的脆性破坏,同时应用以下公式加以控制:

$$\sigma_1 \leq f_y \quad (\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0)$$

在设计中用强度设计值 f 代替上面两式值的 f_y , 并控制最大等效应力不大于 f , 从而使铸钢节点控制在弹性状态。

2.2 尺寸初步设计

铸钢节点的尺寸设计要考虑以下几个方面:

(1) 满足承载力要求。根据铸钢的力学性能指标以及杆件的截面尺寸可以初步推算出节点各杆件的壁厚。12、13 号杆是通过焊缝或销轴和铸钢板相连,也可以通过简单的计算初步确定铸钢板的厚度和宽度。

(2) 满足铸造工艺的要求^[3]。为了保证钢液均匀平稳地进入内腔,钢水凝固速度不能太快,铸钢节点的壁厚不宜过薄。一般来说,空心铸钢管的壁厚是与之相连钢管壁厚的 1.5 ~ 3.0 倍。铸件设计时,不同部位的壁厚相差悬殊,这些部位的连接处壁厚会有急剧变化,浇铸时容易产生缩松、缩孔和内应力,同时出现尖角,妨碍清砂,产生裂纹。所以对于壁厚变化处应设计圆角从而保证圆滑过渡。从受力来看,倒角可以减小应力集中的程度,同时还能提高节点的刚度。

(3) 满足焊接工艺要求。铸钢件与型材成型方法不同,同种材质铸钢件的力学性能指标略低,所以要达到铸钢件与热轧型材等强要求,铸钢件壁厚会稍大。厚壁铸钢管口通常要预留槽口,这样与薄壁热轧钢管焊接时,就可以避免产生较大的焊接应力。焊接槽口的具体尺寸根据铸钢管壁厚与相连钢管壁厚确定。

(4) 满足构造要求,即保证杆件安装时有足够的空间以方便焊接操作,这需要三维空间建模的辅助。

综合以上因素,经过尺寸设计后的铸钢肩谷点原型尺寸和 1:2 模型尺寸取值如表 3。

2.3 有限元模型的线弹性静力分析

结合尺寸初步设计结果和从整体结构计算模型中提取的杆件内力,建立起铸钢节点的有限元模型。首先需要确定的是节点模型的边界条件。肩谷点连接杆件较多,约束情况很复杂。经过不断试算,得出

表 1 铸钢材料化学成分

Table 1 Chemical composition of cast-steel material

铸钢种	C	Si	Mn	P	S	Ni
G20Mn5	0.17% ~ 0.23%	≤0.60%	≤1.00% ~ 1.60%	≤0.020%	≤0.020%	≤0.40%

表 2 铸钢材料 G20Mn5 力学性能

Table 2 Mechanical properties of cast-steel material G20Mn5

热处理状态	铸件最大壁厚/mm	室温下力学性能				强度设计值		
		屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	延伸率 δ /%	冲击功/J	抗拉、抗压和抗弯 f /MPa	抗剪 f_v /MPa	端面承压(刨平顶紧) f_{ce} /MPa
正火(N)	30	300	480 ~ 620	≥20	≥60	235	135	310
调质(QT)	100	300	500 ~ 650	≥22	≥60	235	135	325

表 3 铸钢肩谷点原型和模型尺寸

Table 3 Cast steel shoulder-valley joint prototype and model sizes

杆件编号	原型			模型		
	杆件规格	节点区规格	接头长度/mm	杆件规格	节点区规格	接头长度/mm
12	Φ700 × 16	80 厚板	2700	Φ325 × 12	- 325 × 40	1350
8	Φ700 × 25	Φ700 × 70	2000	Φ350 × 20	Φ350 × 35	1000
6	Φ850 × 30	Φ850 × 80	1500	Φ425 × 16	Φ425 × 40	750
4	Φ800 × 25	Φ800 × 70	1200	Φ400 × 14	Φ400 × 35	600
16	Φ850 × 25	Φ850 × 90	1500	Φ425 × 18	Φ425 × 45	750
13	Φ850 × 35	160 厚板	1200	Φ425 × 20	- 450 × 60 ~ 177 × 60	600

注:接头长度为杆件汇交点到管口的长度。

最接近实际内力分布的边界条件:将两根 8 号杆按固定端约束,其余杆件施加设计轴力和弯矩,这样能够较好地模拟各杆内力(图 5a)。

考虑到试验条件,采用斜向加载的方式以同时模拟节点杆件所受的轴力、弯矩和剪力,具体办法为在管口焊接一球面斜板,斜板的角度 θ 和压力 F 大小求解方法如下:

- (1) 从整体计算模型中查出节点区域杆件的弯矩 M_2 、 M_3 和轴力 N ;
- (2) 利用式 $Q_2 = M_3/L$ 、 $Q_3 = M_2/L$ 求出 Q_2 和 Q_3 。式中 L 为节点域杆件的长度, Q_2 、 Q_3 为与 M_3 、 M_2 匹配的杆端剪力,在整体计算模型中也可以查到;
- (3) 求出 Q_2 和 Q_3 的合力 Q ;
- (4) 求出 Q 与杆件轴力 N 的合力 F 。 F 的方向即斜板的法线方向,由此确定 θ (图 5b、5c)。

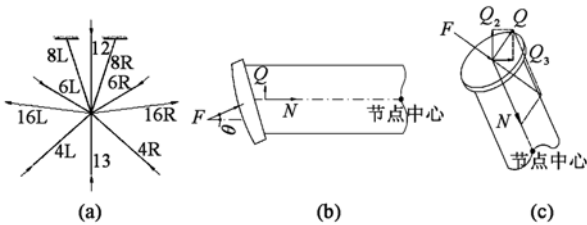


图 5 F 的求解示意图和模型加载方式

Fig. 5 Solution schematic of F and model loading style

肩谷点几何形状和相贯线切割非常复杂,所以首先采用 CATIA V5R17 和 Auto CAD 建立几何模型,再导入 HyperMesh 8.0 划分有限元网格,最后才导入 ANSYS。ANSYS 中提供了多种三维实体单元模型,经过分析比较,采用 SOLID95 单元,SOLID95 为三维八节点六面体单元 SOLID45 的高阶形式,适合用于建造不规则形状模型。

模型材料均采用线弹性模型, $E = 2.06 \times 10^5$ MPa, $\nu = 0.3$ 。忽略扭矩,在管口施加斜向压力 F ,同时模拟节点区域杆件的弯矩、剪力和轴力。

肩谷点通过有限元分析得到的等效应力计算结果如图 6 所示。

从计算结果可以看出,除个别点外,铸钢节点上的最大应力小于在节点区域加长焊接的杆件,且小于铸钢材料的屈服点,满足强度设计原则。

最大应力出现在 13 号杆销孔受压壁上,局部已达到屈服点。试验模型中 13 号杆连接的铸钢板厚度 60mm,销孔两侧壁厚增加至 80mm,对应于实际节点厚 120mm,销孔两侧壁厚 160mm。根据计算结果,此处成为试验测试的重点。

除了 13 号杆销孔以外,最大应力出现在加焊的 16 号拉杆上,考虑到虽然试验模型采用 Q345B,计算模型中也按 Q345 的屈服强度取值,但实际工程中该

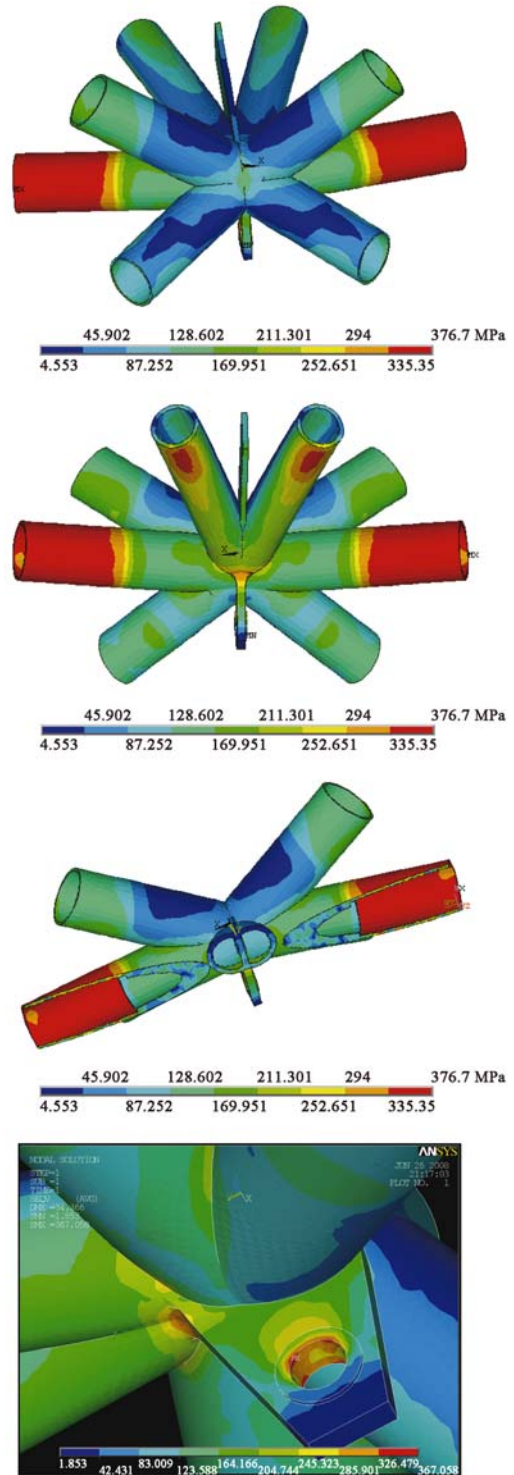


图 6 节点等效应力云图

Fig. 6 von Mises' stress cloud diagram of joint

拉杆采用 Q390 材质,杆件应力比并不大。而且在杆件和节点区焊接处,铸钢厚度大于管材壁厚,所以其承载能力是有保证的。

杆件相交的地方应力较大,特别是在中轴平面与 6、8 号杆交界的区域,这些可以通过倒角来减小应力集中的现象,经试算,确定了每个杆件相交处的倒角半径,一般为 30 ~ 50mm。

铸钢节点由于管壁厚度很大,且内部非贯通,所以变形很小,从有限元分析结果来看,主要变形都是加焊的杆件,铸钢节点原型中变形最大的为4、13号杆件端部,为2.2~2.5mm,根据相似比,节点模型的最大变形为1.1~1.3mm,所以其刚度可满足设计要求。

3 试件制作与模型试验

3.1 试件制作和材性试验

根据前述的设计和计算确定了铸钢肩谷点的设计图,交付厂家制作,图7a和图7b为节点の木模。浇铸时留下同炉钢水制作试件,试验前对试件的化学成分和力学性能进行测试。化学成分检验由厂家完成。力学性能试验时,将试样取芯加工成标准试件,并在其拉伸方向贴应变片,通过3个试件的拉伸试验,获得了铸钢材料的弹性模量值 $1.9 \times 10^5 \text{MPa}$ 以及屈服强度值 313MPa。图7c为材料的应力-应变关系曲线。

3.2 自平衡反力架

性能良好、工作稳定的反力架是保证试验顺利进行的前提。肩谷点模型试验时多点同时加载,最大拉力达到 6700kN,因此反力架必须具有足够的强度与刚度,保证不会因反力架的强度不足或过大变形而影响试验的进行^[45]。因本项目还要兼顾另外

几个焊接节点的试验,且均为弯矩、轴力复合空间加载,所以专门设计并制作了自平衡的空间加载全钢反力架。反力架由8根钢柱和3道圈梁组成,构件全部采用箱形截面,最大截面尺寸为 $\square 800 \times 600 \times 30$,材料采用 Q345B,总用钢量近 70t。反力架安装完成后安全稳定地使用了约4个月,顺利完成了4种类型共10个空间节点的模型试验。

铸钢节点试件的准确安装是保证试验结果可靠的基础。本次试验的节点模型是按照1:2的比例进行制作的,由8台千斤顶沿相应杆件端部斜板的法线方向同步加载。为保证试件安装时的定位准确,采用 SolidWorks 对节点和反力架之间的转接件进行深化设计,建立详尽的三维模型指导现场安装,如图8所示。测试结果表明,转接件安装的现场实测数据与理论模型数据相差在3mm以下,试件安装精度达到试验要求。

3.3 测点布置

根据有限元分析得到的节点各个区域的应力分布及试验需要,在节点上布置了应变测点和位移测点。考虑到节点区域受力复杂,应变测点均采用应变花。由于节点空间尺寸、受力形式以及边界条件均是关于12号杆和13号杆所形成的平面对称,因此应变测点的设置也是关于这个平面对称的,按此设置还可用于检验应力分布是否对称。

应变测点布置的原则是每根管的管端至相贯线



图7 节点制作时的木模以及材料的应力-应变关系

Fig. 7 Joint-making wood mode and stress-strain relationship of cast-steel specimen

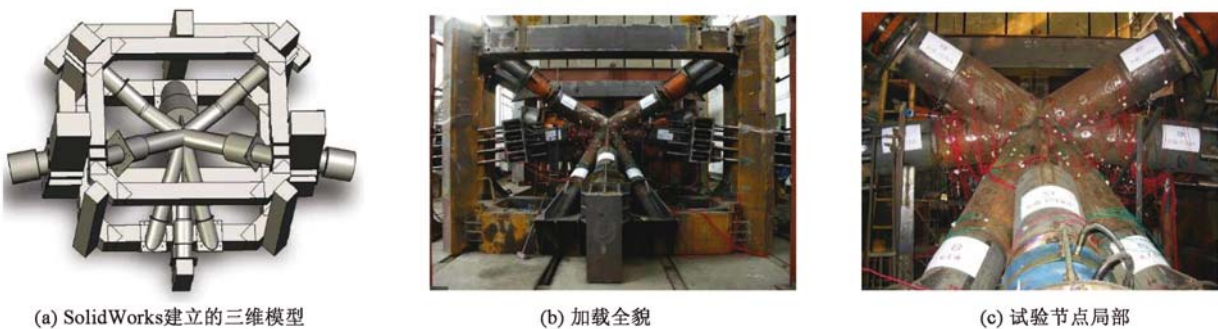


图8 肩谷点试件安装模型与实测现场

Fig. 8 Shoulder-valley point specimen installation model and worksite

布设三圈测点,每圈以 90°间隔设 4 只应变花,而在相贯线附近应变花加密为 8 只。另外,在加焊的钢管上以 90°间隔设 4 只应变片,试验加载时测读可以检验加载是否准确均匀。

为了测量节点各杆件的轴向变形和转角,在每根管的端部设沿轴向的位移测量点,在主弯矩平面设转角测量点,测试仪器采用应变计和百分表。

图 9 所示为节点应变测点布置。模型试验中,13 号杆是通过销轴与铸钢节点耳板连接的,考虑到有限元分析时此处应力最大,为检验耳板的应力,在销孔四周对称布置应变花,如图 10 所示。

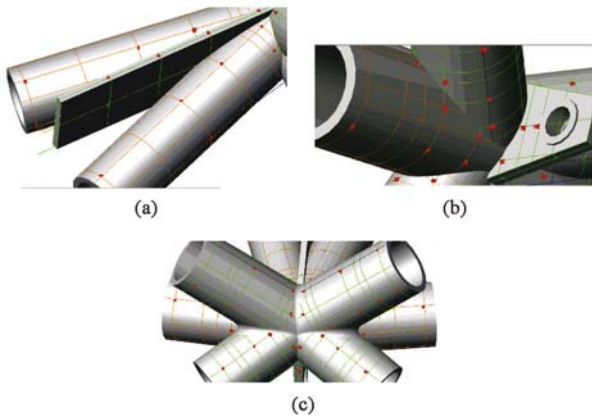


图 9 应变测点布置图

Fig. 9 Layout of strain measuring points

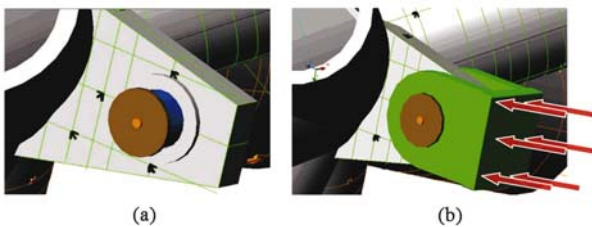


图 10 耳板和销孔处的应变测点布置图

Fig. 10 Layout of strain gauges in ear hole plates and pin-bolt

3.4 试验仪器

千斤顶:1000kN 千斤顶 2 台,2500kN 千斤顶 2 台,4500kN 千斤顶 2 台,10000kN 千斤顶 2 台,12000kN 千斤顶 1 台;与千斤顶配套油压表及数据采集仪器。

钢结构专用应变花 136 个,应变片 36 个,DH3816 静态应变数据采集仪 10 台;计算机 2 台,试验数据直接读入并贮存于相应的计算机系统或数据采集系统中。

3.5 试验过程

根据文献[2]和文献[6]的建议,铸钢节点试验最小加载值不小于设计荷载的 1.3 倍,所以试验之初按此准备加荷设备。各杆件端部加载设计值如表 4 所示。

另外,还确定了 3 个试验破坏准则:①塑性区域相连成片;②管壁凹陷或凸起超过管径的 3%;③荷载-位移曲线下降,加载难以为继。

试验采用同步、分级加载制度。同步开泵,根据油压表读数来进行加载控制,加载时间为每级荷载 2min,每级增加 10% 设计荷载,直至 1.3 倍设计荷载或达到前述的 3 个破坏准则时停止。每一级荷载施加完毕后,均持荷 5min,使试件变形充分,并使得各千斤顶、试件和反力架有充分的时间进行自平衡调整,必要时补加,从而基本保证施加荷载的同步性和准确性。

试验过程中密切留意焊接杆端应变片读数的变化,与由设计加载值 N 和焊接管横截面积 A 计算得到的应变值 $\varepsilon = \frac{N}{EA}$ 作比较以校核所加荷载是否与设计荷载相同,图 11 为 6L 和 16R 杆端应变实测值与计算值的比较。

由图 11 可见试验加载值与设计加载值吻合程度很好。其它杆件的情况也是如此。各条曲线基本呈

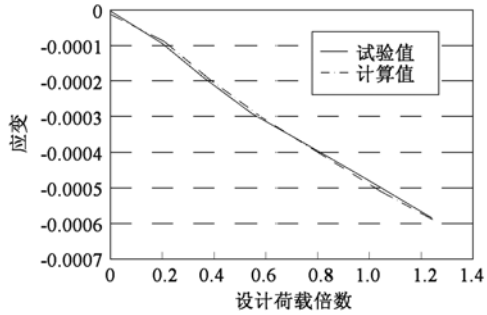
表 4 肩谷点原型和模型加载设计值

Table 4 Shoulder-valley joint prototype and model internal force value

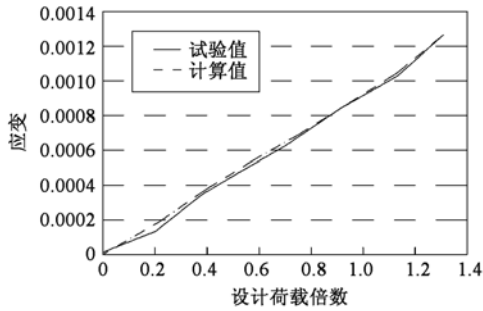
杆件编号	N/kN	$M_2/kN \cdot m$	$M_3/kN \cdot m$	Q_2/kN	Q_3/kN	q_2/kN	q_3/kN	Q/kN	F/kN	$1.3F/kN$	
12	原型	-3822	2	-1048	-153	1	-275	1	275	-3831	4981
	模型	-955	0	-131	-38	0	-69	0	69	-958	1245
6	原型	-7532	-523	-1685	-370	-92	-647	-201	677	-7562	9831
	模型	-1883	-65	-211	-93	-23	-162	-50	169	-1891	2458
4	原型	-3886	-1760	-2161	-399	-211	-965	-786	1244	-4080	5304
	模型	-971	-220	-270	-100	-53	-241	-196	311	-1020	1326
16	原型	20666	-26	-493	-138	-2	-189	-10	189	20667	26867
	模型	5167	-3	-62	-35	-1	0	0	0	5167	6717
13	原型	-11063	0	0	32	1	0	0	32	-11063	14382
	模型	-2766	0	0	8	0	0	0	0	2766	3596

注:1. q_2, q_3 分别为根据节点长度由模拟弯矩 M_2, M_3 而产生的剪力,其余字母的意义与图 5b 相同;

2. 12 号杆加焊管与铸钢节点板焊接 250mm,因此模拟模型 M_2, M_3 所用计算长度为 1905mm。



(a) 6L号杆焊接管端应变-荷载曲线



(b) 16R号杆焊接管端应变-荷载曲线

图 11 6L、16R 号杆焊接管端应变-荷载曲线

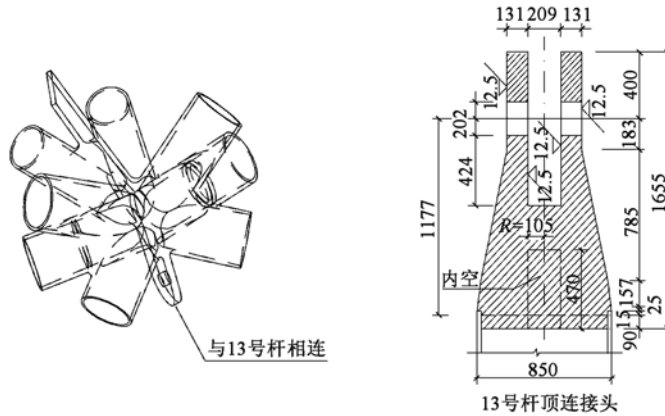
Fig. 11 Strain-load curves of measurement point at the end of welded pipe 6L and 16R

线性递增。这表明以油压表读数来控制施加荷载大小的加载方案可行,且具有相当的精度;同时说明,试件的安装位置准确,反力架提供的边界条件与理论预期接近,从而保证了节点模型试验应力测值的可靠性。

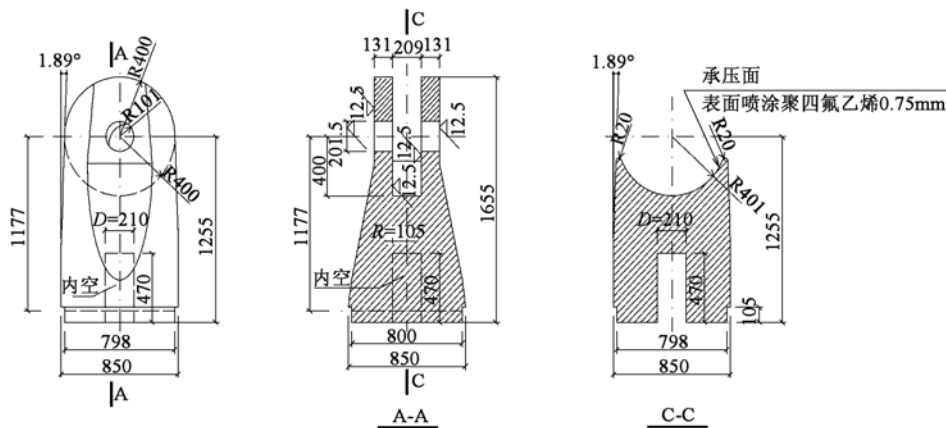
试验过程未出现任何异常,未听见任何钢材断裂响声。加载至1.3倍设计荷载的试验全过程中,从现场测读的应变值来看,节点大部分区域仍处于弹性受力状态。

试验发现,耳板左右两侧应变花读数并不呈现理想的对称性,而是一边偏大,并且随着荷载的增长其偏差越来越大。试验结束后,将销轴取出,发现销轴和销孔受压孔壁的偏斜受压,销轴明显变形。

精心制作和安装的试件在试验中出现了销轴受压偏斜变形的情况,那么实际工程中必定无法避免此问题的发生。设计销轴连接的节点时,一般会在耳板之间预留很小的间隙,使其紧密贴合,同时要求将销轴进行调质以增加其硬度。但这样一方面会增加安装的难度,另一方面原型肩谷点的销轴直径240mm,销孔处的板厚160mm,调质对其作用不大,所以需要修正13号杆的连接方式。



(a) 试验前的设计图



(b) 试验后的设计图

图 12 13号杆接头在试验前后的设计图对比

Fig. 12 Design chart of the 13th bar joint before and after test

对该节点进行了修改,使杆件的插耳直接与13号杆的板端接触,增大两个构件间的接触面,销轴仅仅作限位构件,如图12所示。这样即避免了出现销轴和销孔因偏斜受压而损坏的情况。

加载不同步的程度被尽可能地控制到很小,可以认为试验时的位移测量值比较准确地反映了节点的实际刚度。试验结果显示直到加载至1.3倍设计荷载时,铸管轴向变形以及转角很微小,和本文2.3计算结果相吻合。

由此可以得出结论:由于铸钢节点管壁厚、内部不贯通且相贯线有倒角的原因,其刚度非常大,所以在整体结构分析时,可以作杆件刚接的假定。

3.6 理论与试验结果的对比分析

分析采集到的节点区域测点应变值(除13号杆以外),可以看出测点的应变随荷载的增加都基本呈线性增大,可以认为在1.3倍设计荷载作用下,各测点均处于弹性状态。图13所示是抽取几个测点,比较其应力测试值与计算值,可以看到吻合程度比较好。试验中的大部分测点的读数和计算值的比较都能达到与图13所示的测点相近的吻合程度。

通过模型试验测得的等效应力与计算值对比可知,两者虽然基本吻合,但仍存在误差,经分析,总结主要原因是:

(1) 铸钢节点杆件壁厚较大,采用平面应力假设时忽略了壁厚方向的主应力,与实际有出入。

(2) 由于铸钢节点采用砂模制作,几何尺寸的准确度不高,节点相贯处复杂的几何构型往往难以精确制作,因此会有尺寸误差,这样也导致计算值与试验值不完全一致。试验测得的应力绝大部分比计算值偏小,这主要是因为试件管壁厚度大多超过设计值。对每个铸钢管端进行了8个点的测量,结果如表5所示。

(3) 计算边界条件与实际边界条件有差别。试件固定端不可能实现完全的固结,为了适应加载的杆端的转动,端板设置的是球冠面,但这样可能会导致加载方向的偏移。

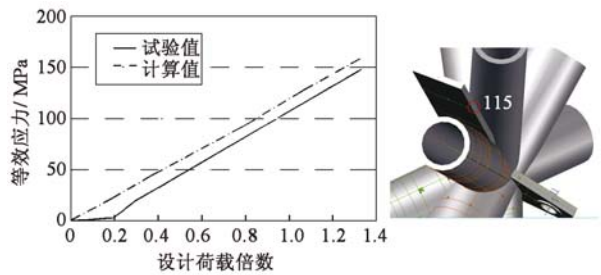
(4) 多个千斤顶共同工作的同步效果仍难以达到理想状态。

(5) 试验中各测点的位置一般不与有限元计算的单元节点完全重合,在此情况下,测点应力的计算值还要利用相邻节点进行插值计算。

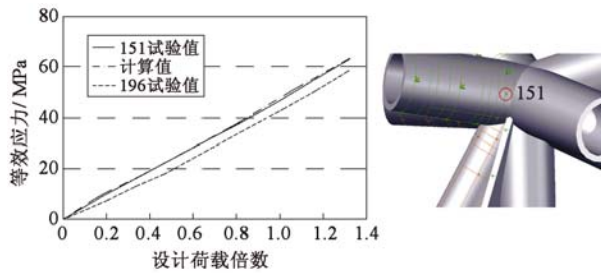
(6) 通过电阻应变片测量应变本身也有其误差,这对试验结果的吻合程度有一定影响。

(7) 有限元方法本身就是一种近似的数值计算方法,由于网格尺寸、单元特性等多方面的影响,其结果与实际是有一定差别的。

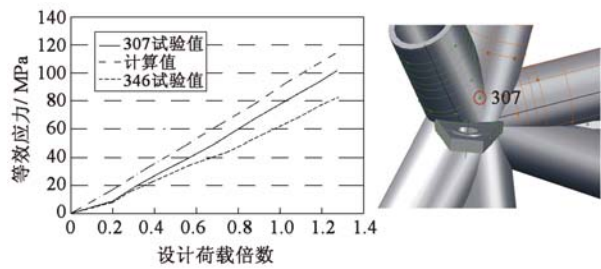
尽管有各方面的原因造成试验和计算误差,但



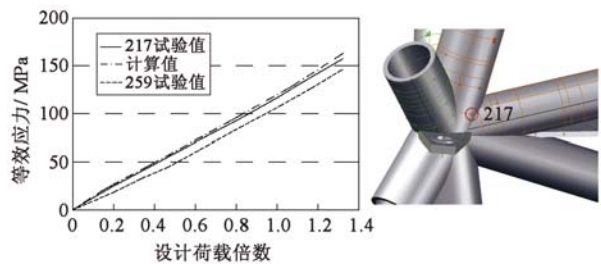
(a) 12号杆115测点(右图红圈表示)的等效应力-荷载曲线



(b) 6号杆151测点(右图红圈表示)及与其对称的196测点的等效应力-荷载曲线



(c) 4号杆307测点(右图红圈表示)及与其对称的346测点的等效应力-荷载曲线



(d) 16号杆217测点(右图红圈表示)及与其对称的259测点的等效应力-荷载曲线

图13 部分测点的应力与计算值的对比

Fig. 13 Comparison of stress between test values and analytical values

从大量数据可以看出本项目的试验结果仍然具有相当的可靠性,用于实际工程是完全可行的。

4 结论

本文结合深圳大运中心体育馆钢结构的关键连接节点,通过对铸钢节点的构造选型和模型试验研

表5 铸钢节点管壁实测厚度

Table 5 Measured wall thickness of cast steel nodes

杆件编号	理论壁厚 /mm	实测厚度(误差)/mm							
		测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点7	测点8
16R	45	45.5(0.5)	43.0(-2.0)	46.5(1.5)	46.0(1.0)	49.5(4.5)	47.0(2.0)	48.0(3.0)	48.0(3.0)
16L	45	46.0(1.0)	46.0(1.0)	46.0(1.0)	49.0(4.0)	47.0(2.0)	48.0(3.0)	49.0(4.0)	44.0(-1.0)
6R	40	40.0(0)	37.5(-2.5)	39.0(-1.0)	41.0(1.0)	47.0(7.0)	46.0(6.0)	43.0(3.0)	40.5(0.5)
6L	40	39.5(-0.5)	42.5(2.5)	34.0(-6.0)	44.0(4.0)	40.5(0.5)	38.0(-2.0)	39.0(-1.0)	39.5(-0.5)
4R	35	36.0(1.0)	33.0(-2.0)	34.0(-1.0)	36.0(1.0)	39.0(4.0)	36.0(1.0)	38.0(3.0)	34.5(-0.5)
4L	35	35.0(0)	36.0(1.0)	39.0(4.0)	35.0(0)	37.0(2.0)	36.5(1.5)	39.0(4.0)	35.0(0)
8R	35	37.0(2.0)	34.5(-0.5)	33.5(-1.5)	36.0(1.0)	36.5(1.5)	39.0(4.0)	37.0(2.0)	34.5(-0.5)
8L	35	39.0(4.0)	35.0(0)	35.0(0)	41.5(6.5)	38.0(3.0)	37.0(2.0)	35.0(0)	36.0(1.0)

注:8个测点为在铸钢管口沿圆周均匀设置。

究,得到了如下结论:

(1)经多次比选研究所确定的肩谷铸钢节点在承载力和刚度方面都能够满足结构的安全性和适用性要求。

(2)有限元分析得到的应力分布、变形情况和破坏部位与试验结果能较好吻合,说明按本文采用的方法所进行的有限元分析可用于预测铸钢节点的力学性能。事实上,大运会体育馆的其它节点都用有限元方法进行分析和设计。

(3)铸钢节点刚度很大,符合刚接的计算假定。

参 考 文 献

- [1] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. (in Chinese))
- [2] CECS 235:2008 铸钢节点应用技术规程[S]. (CECS 235:2008 Technology order for application of steel joints[S]. (in Chinese))
- [3] 王开强. 铸钢节点破坏机理及其承载能力理论分析

[D]. 天津:天津大学, 2005. (WANG Kaiqiang. Theoretical analysis of collapse mechanism and bearing capacity of cast steel joints [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))

- [4] 卜德岭. 空间结构大型节点试验全方位加载系统的机构设计[D]. 杭州:浙江大学, 2006. (PU Deling. Design on point loading test rig of large space structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))
- [5] 张禁,张文元,张耀春. 多功能加载装置的研制和应用[J]. 工业建筑,2004,34(3):40-43. (ZHANG Jin, ZHANG Wenyuan, ZHANG Yaochun. The research and manufacture of cast steel joints for multiangular steel structure[J]. Industrial Construction, 2004, 34 (3) : 40-43. (in Chinese))
- [6] GB/T 50344—2004 建筑结构检测技术标准[S]. (GB/T 50344—2004 Technical standard for inspection of building structure[S]. (in Chinese))