

新型螺栓球柱节点静力承载性能试验研究

郭小农¹, 黄泽韡¹, 杨商飞¹, 彭礼²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海泰大建筑科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 在传统网架螺栓球节点的基础上, 研发了一种可用于无檩网架的新型节点——螺栓球柱节点. 进行了 13 个螺栓球柱节点的承载力试验. 试验结果表明, 螺栓球柱节点主要有圆柱筒壁压扁破坏、圆柱筒壁冲切破坏、螺栓拔出破坏、焊缝拉裂破坏等 4 种破坏模式; 在压力和拉力荷载作用下, 圆柱筒壁主要承受环向应力; 设置加劲肋可以较大幅度地提高节点承载力和增强节点刚度.

关键词: 无檩网架; 螺栓球柱节点; 压扁破坏; 冲切破坏; 螺栓拔出破坏

中图分类号: TU395.01

文献标志码: A

Experimental Study of Static Bearing Behavior of Bolted Ball-Cylinder Joint

GUO Xiaonong¹, HUANG Zewei¹, YANG Shangfei¹, PENG Li²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai T&D Architectural Technology Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the conventional bolt-ball joint of gird structure, a novel gird structure joint——bolted ball-cylinder joint which could be used on non-purlin gird structure was created. Load-bearing capacity experiments including 13 bolted ball-cylinder joints were conducted. First, the experimental program was introduced in detail. Subsequently, the collapse phenomena of bolted ball-cylinder joint were described. It is found that their failure modes mainly include flattening damage of cylinder wall, punching failure of cylinder wall, bolt pullout failure and weld strength failure. The cylinder wall is mainly subjected to hoop stress when the joint is under tension or compression. Setting stiffener can effectively increase the load-bearing capacity and stiffness of joint.

Key words: non-purlin gird structure; bolted ball-cylinder joint; flattening damage; punching failure; bolt pullout failure

在众多形式的空间结构中, 网架结构是近半个世纪以来在国内外得到推广和应用最多的一种形式^[1-2], 我国对于网架结构及其节点的研究也非常成熟^[3-4], 还有不少学者提出了各种新型的网架节点型式^[5-8].

对于传统的网架结构, 节点通常采用螺栓球节点或者焊接空心球节点; 杆件通常采用圆钢管, 按轴心受力构件进行设计. 为了避免杆件受弯, 所有荷载必须作用在节点上; 因此, 为了铺设屋面板, 通常在节点上还需另外设置檩条. 这就会增加构件种类及数量, 增加建筑高度. 尤其对于外观要求较高的采光顶工程, 上弦杆件和檩条这两层构件叠置, 视觉效果较差.

相对于传统的网架结构, 近年来有学者提出一种无檩网架结构体系^[9]. 无檩网架的上弦杆通常采用矩形管截面, 可以兼作檩条, 能够承担弯矩和轴力; 无檩网架的下弦杆和腹杆根据受力情况可以仍然按二力杆设计. 无檩网架和传统有檩网架相比最大的优点在于降低了建筑净高, 外形更加美观, 施工更加便捷.

1 螺栓球柱节点构造

螺栓球柱节点是彭礼和郭小农^[10]提出的一种新型无檩网架上弦节点, 其具体构造如图 1 所示. 该节点由两部分组成: 下半部分为实心螺栓半球节点, 其构造和传统的螺栓球节点相同; 上半部分为空心圆柱体, 空心圆柱体尺寸和开孔尺寸根据无檩网架上弦杆件规格确定; 两部分之间采用等强焊接连接. 为了增加节点的刚度和承载力, 也可以在空心圆柱体顶部设置加劲肋. 无檩网架的上弦杆采用矩形管截面, 端部和弧形端板等强焊接; 端板的弧面尺寸和空心圆柱体相契合, 弧形端板上设置 2 个内螺纹孔. 上

收稿日期: 2014-11-20

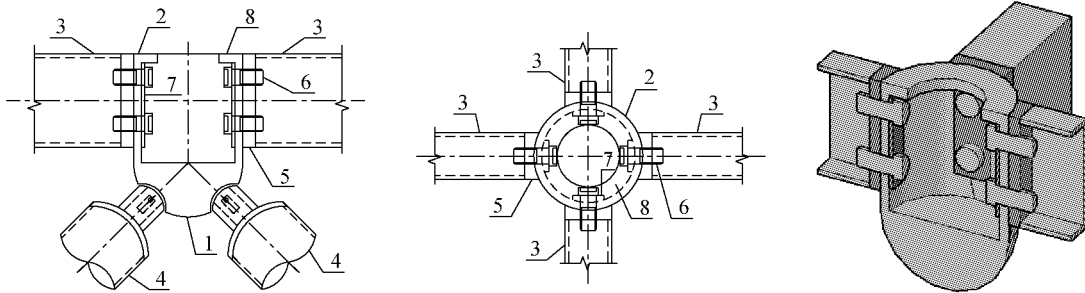
基金项目: 国家自然科学基金(50908168, 51478335)

第一作者: 郭小农(1977—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为空间钢结构. E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者: 黄泽韡(1992—), 女, 硕士生, 主要研究方向为钢结构原理与施工技术. E-mail: yayahuangzewei@126.com

弦杆弧形端板和节点圆柱体之间采用内六角高强度螺栓连接;螺栓自内向外拧紧,圆柱体内的空腔提供

操作内六角高强度螺栓的空间.最后,为了使螺栓和空心圆柱体内壁完全接触,还设置了弧形垫片.



1—实心螺栓半球;2—空心圆柱体;3—方管上弦;4—圆管腹杆;5—弧形端板;6—高强螺栓;7—弧形垫片;8—加劲肋

图 1 螺栓球柱节点示意图

Fig.1 Configurations of bolted ball-cylinder joint

这种新型螺栓球柱节点外形美观,构造精巧,对于外观要求较高的采光顶结构尤其适用,具有广阔的应用前景.为了探究这种新型螺栓球柱节点的破坏模式、节点承载力和节点刚度等性能,本文进行了 13 个螺栓球柱节点试验,详细介绍了试验过程,描述了试验现象,总结了其破坏模式、承载力特性和刚度特性.试验数据为后续的节点承载力以及节点刚度研究提供了基础.

表示了受压、受拉、强轴受弯、弱轴受弯.

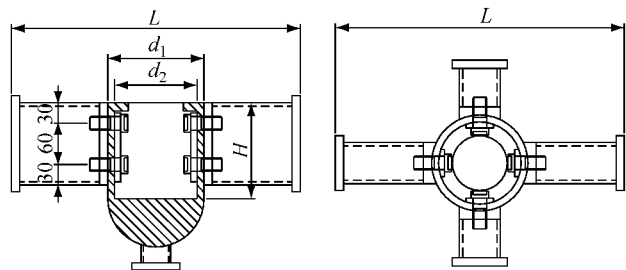


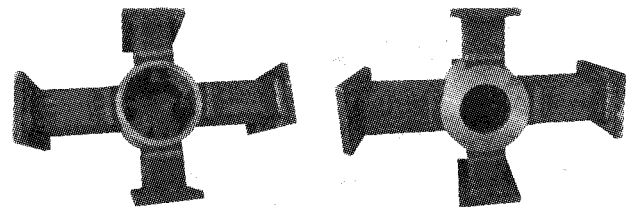
图 2 试件加工图(单位:mm)

Fig.2 Demension of specimens(unit: mm)

2 试验简介

2.1 试件设计

本文共设计了 13 个螺栓球柱节点试件,试件详图如图 2 所示,部分试件的照片如图 3 所示.每个节点圆柱端均连接 4 根矩形钢管,相邻杆件角度均为 90° ,杆件截面规格均为 $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 5\text{ mm}$,较长杆件长度为 116 mm,较短杆件长度为 56 mm.对于螺栓球柱节点而言,螺栓半球部分通常不会发生破坏,因此在设计试件时将下半球简化为一个实心半球,为了加载方便,在半球外侧焊接了一根 $\Phi 43\times 3\text{ mm}$ 、长 40 mm 的圆管.所有节点的螺栓型号采用 M20,性能等级为 10.9 级.弧形端板高度 120 mm,宽度 60 mm,螺栓边距 30 mm,螺栓间距 60 mm;增设了加劲肋的试件,其加劲肋宽度 20 mm,加劲肋厚度 12 mm,加劲肋通过精加工和圆筒一起成型.杆件及节点的材料牌号均为 Q235 钢材.



JD1-H140-T10-RN-C

JD5-H140-T10-RY-C

图 3 部分试件照片

Fig.3 Two specimens

2.2 加载方案

本试验共采用了 4 种加载方式,分别为单向施加压力、单向施加拉力、强轴弯曲加载和弱轴弯曲加载.加载方式如图 4 所示.其中,对 6 个节点进行了压力加载.由于螺栓球柱节点主要用于网架上弦,网架的上弦通常是受压构件,且单向受压比双向受压更加不利,故在加载时采用了单向压力加载.在悬挑网架中也可能出现上弦杆受拉的情况,故对 3 个节点进行了拉力加载.另外,为了考虑节点的转动刚度以及在弯矩作用下的承载性能,还各取 2 个节点进行了强轴弯曲加载和弱轴弯曲加载.所有荷载均通过杆件的中心线.

表 1 给出了所有试件的具体信息.表 1 中,“JD”代表试件编号;“H”代表圆柱部分高度;“T”代表圆柱壁厚;“RY”表示设置了加劲肋,“RN”表示无加劲肋;“C”,“T”,“SB”,“WB”均表示加载方式,分别代

表 1 螺栓球柱节点模型试件汇总表

Tab.1 Geometrical parameters of bolted ball-cylinder joint specimens corresponding to Fig.2

试件编号	圆柱外径 d_1/mm	圆柱内径 d_2/mm	圆柱高度 H/mm	圆柱壁 厚/ mm	是否有 加劲肋	加载方式
JD1-H140-T10-RN-C	140	120	140	10	无	单向受压
JD2-H160-T12-RN-C	140	116	160	12	无	单向受压
JD3-H120-T12-RN-C	160	136	120	12	无	单向受压
JD4-H120-T10-RN-C	180	160	120	10	无	单向受压
JD5-H140-T10-RY-C	140	120	140	10	有	单向受压
JD6-H120-T08-RY-C	140	124	120	8	有	单向受压
JD7-H120-T08-RN-T	140	124	120	8	无	单向受拉
JD8-H160-T08-RN-T	180	164	160	8	无	单向受拉
JD9-H120-T08-RY-T	140	124	120	8	有	单向受拉
JD10-H140-T08-RN-SB	160	144	140	8	无	强轴受弯
JD11-H160-T12-RY-SB	140	116	160	12	有	强轴受弯
JD12-H160-T10-RN-WB	160	140	160	10	无	弱轴受弯
JD13-H140-T12-RN-WB	180	156	140	12	无	弱轴受弯

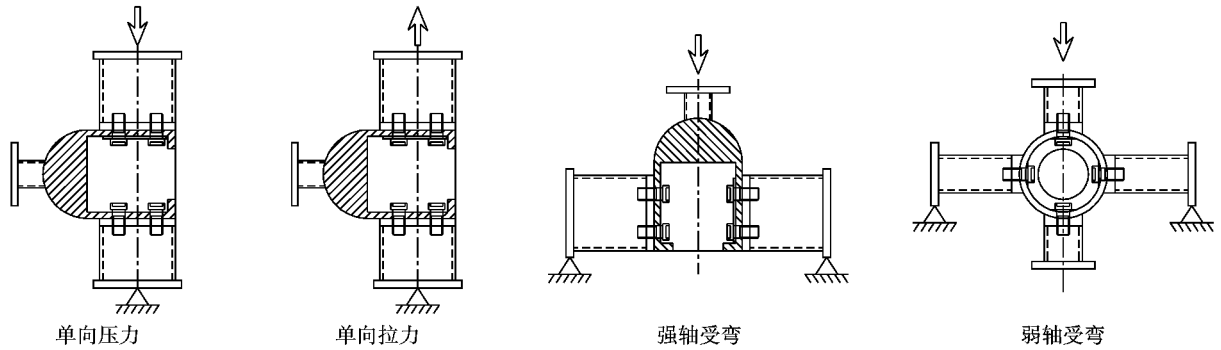


图 4 加载方式

Fig.4 Loading schemes

2.3 测点布置

如图 5 所示,对于受拉和受压试件,在圆柱体管口
口交差布置位移计(D_1, D_2)测量圆柱体管口的相对
位移.圆柱体在 A—A, B—B 截面处各布置 4 枚应变

片($S_{A1} \sim S_{A4}, S_{B1} \sim S_{B4}$),与水平、竖直方向夹角 45° ,
用于测量节点受力时圆柱筒壁的应变.受力杆的
C—C, D—D 截面各布置 4 枚应变片($S_{C1} \sim S_{C4}, S_{D1} \sim$
 S_{D4}),用于校核轴力的大小.

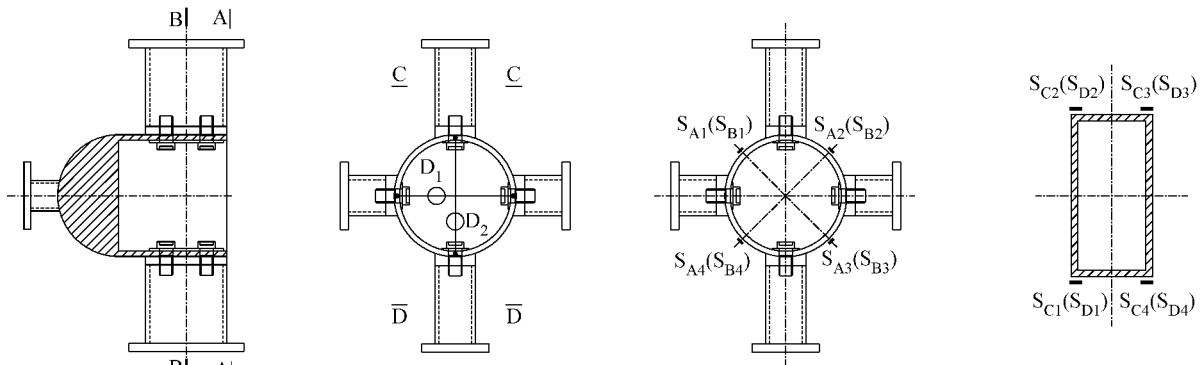


图 5 单向受力构件测点布置图

Fig.5 Measuring point arrangement of axis loading specimens

如图 6,7 所示,对于受弯试件,在圆柱筒壁两侧
和支座端板处布置位移计(D_1, D_2, D_3, D_4),用于测
量节点受弯时的挠度.圆柱体在 A—A, B—B 截面处
各布置 4 枚应变片($S_{A1} \sim S_{A4}, S_{B1} \sim S_{B4}$),与水平、竖

直方向夹角 45° ,用于测量节点受力时圆柱筒壁的应
变量.受力杆的 C—C, D—D 截面处各布置 4 枚应变
片($S_{C1} \sim S_{C4}, S_{D1} \sim S_{D4}$),测量弯矩的大小.

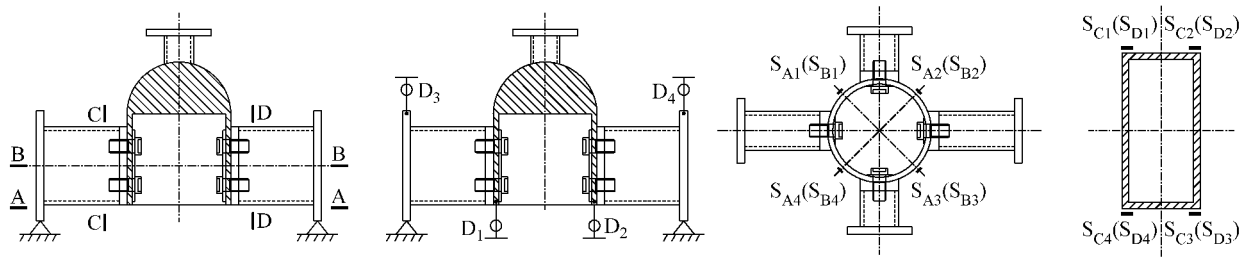


图 6 强轴受弯构件测点布置图

Fig.6 Measuring point arrangement of strong-axis bending specimens

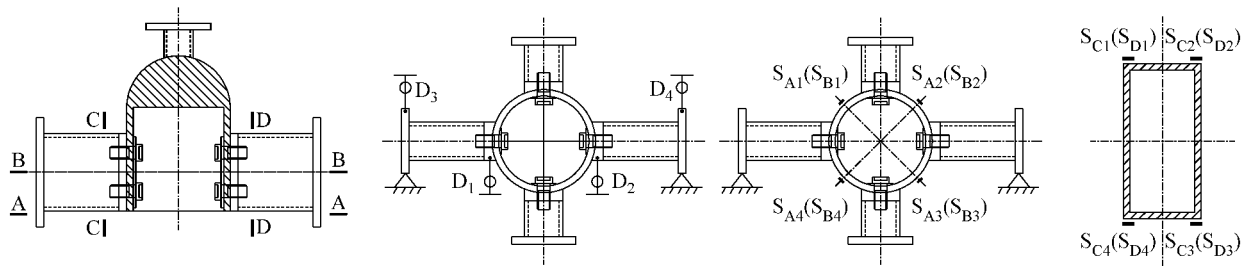


图 7 弱轴受弯构件测点布置图

Fig.7 Measuring point arrangement of weak-axis bending specimens

2.4 材性试验

试验前从空心圆柱体的芯部取样,共制作了 6 个材料拉伸试样,拉伸试验结果如表 2 所示,破坏后的拉伸试样如图 8 所示。

表 2 材性试验结果

Tab.2 Result of tensile test

试件编号	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa	伸长率 δ_5 /%	屈服强度 f_y /MPa
M1	435.20	233 554	31.00	224.49
M2	472.57	196 785	28.58	242.75
M3	442.83	198 841	30.27	212.43
M4	457.69	203 056	35.21	222.00
M5	453.64	200 319	31.73	202.01
M6	436.42	224 512	29.97	202.04
平均值	449.73	209 511	31.13	215.67

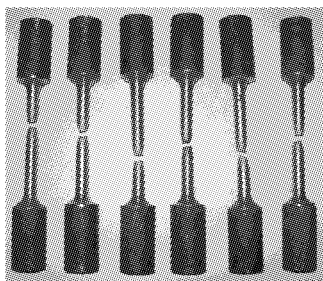


图 8 破坏的拉伸试样

Fig.8 Material test of specimens

3 试验现象简述

试验完成后,将试件拆卸观察,根据试件的破坏

现象可以归纳出各试件的破坏模式(表 3)。部分试件破坏时的照片如图 9 所示。

4 试验结果分析

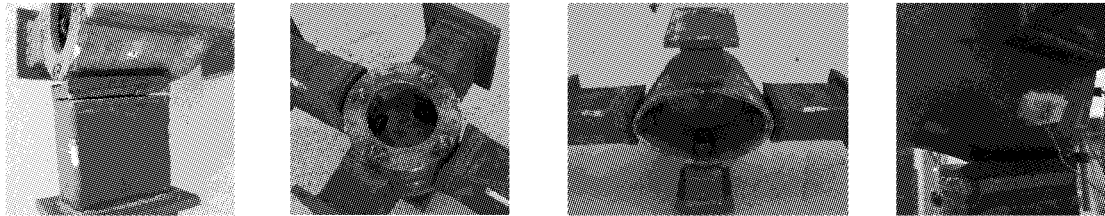
4.1 实测荷载-位移曲线

图 10 给出了部分单向受压试件的管口压缩变形的实测荷载-位移曲线;图 11 为图 10 的加载初期曲线。图 10,11 中,横轴代表管口相对压缩变形,纵轴为荷载。从图 10 可以看出,在压力作用下,节点的压缩变形能力很强,呈现出很好的延性。在加载初期荷载位移曲线基本为直线,随着荷载的增加,孔壁逐渐进入塑性,刚度逐渐降低。结合图 11 及表 3 可知,JD5-H140-T10-RY-C 由于设置了加劲肋,其初始刚度明显大于其他试件,承载力也最高;而 JD6-H120-T08-RY-C 虽然也设置了加劲肋,但其圆柱筒壁较薄,受压承载力小于其他试件。比较各试件的承载力可知,筒壁厚度对受压承载力有较大影响,筒壁越薄,受压承载能力越差。受压试件中,仅有 JD4-H120-T10-RN-C 为冲切破坏,发生破坏时节点的变形较小,延性比其他试件更差,且破坏发生时很突然,属于脆性破坏,故在实际工程中应尽量避免。

图 12 给出所有单向受拉试件的管口拉伸变形的实测荷载-位移曲线。图中,横轴代表管口相对拉伸变形,纵轴为荷载。从图 12 可以看出,在拉力作用下,未设加劲肋的 JD7-H120-T08-RN-T, JD8-H160-T08-RN-T 管口变形较大,呈现出很好的塑

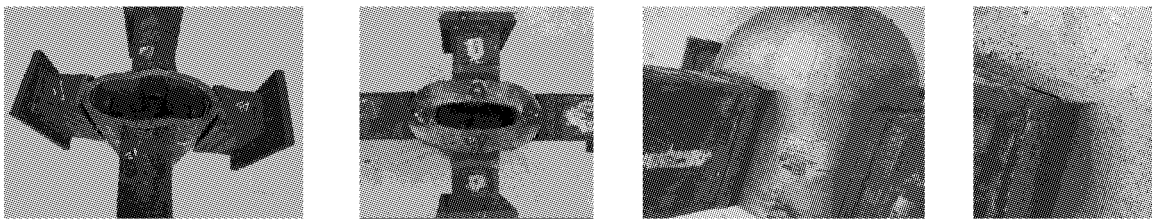
表 3 试验结果汇总
Tab.3 Results of tests

试件编号	加载类型	主要破坏现象	破坏模式	最大荷载/kN
JD1-H140-T10-RN-C	单向受压	筒口变形过大	圆柱筒壁压扁破坏	341.60
JD2-H160-T12-RN-C	单向受压	筒口变形过大	圆柱筒壁压扁破坏	391.68
JD3-H120-T12-RN-C	单向受压	筒口变形过大	圆柱筒壁压扁破坏	446.00
JD4-H120-T10-RN-C	单向受压	节点连接杆件处冲切破坏	节点冲切破坏	349.20
JD5-H140-T10-RY-C	单向受压	筒口变形过大	圆柱筒壁压扁破坏	440.60
JD6-H120-T08-RY-C	单向受压	筒口变形过大	圆柱筒壁压扁破坏	272.20
JD7-H120-T08-RN-T	单向受拉	焊缝开裂,筒壁变形较大	焊缝强度破坏	167.70
JD8-H160-T08-RN-T	单向受拉	螺栓先拔出,后焊缝开裂,筒壁变形较大	螺栓拔出破坏	178.40
JD9-H120-T08-RY-T	单向受拉	焊缝开裂,筒壁未见明显变形	焊缝强度破坏	186.10
JD10-H140-T08-RN-SB	强轴受弯	螺栓拔出,筒壁变形较大	螺栓拔出破坏	161.00
JD11-H160-T12-RY-SB	强轴受弯	螺栓拔出,筒壁变形不明显	螺栓拔出破坏	190.30
JD12-H160-T10-RN-WB	弱轴受弯	螺栓拔出,筒壁有可见变形	螺栓拔出破坏	82.20
JD13-H140-T12-RN-WB	弱轴受弯	螺栓拔出,筒壁有可见变形	螺栓拔出破坏	135.20



a JD9-H120-T08-RY-T 焊缝拉裂

b JD8-H160-T08-RN-T 螺栓拔出



c JD1-H140-T10-RN-C, JD5-H140-T10-RY-C 筒壁压扁

d JD4-H120-T10-RN-C 筒壁冲切破坏

图 9 部分试件破坏时照片
Fig.9 Specimens after testing

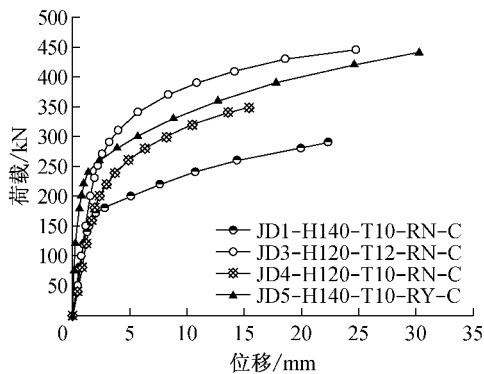


图 10 部分受压试件管口压缩变形的荷载-位移曲线
Fig.10 Load-displacement of compression specimens

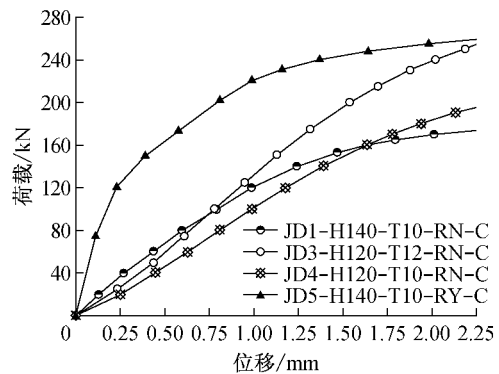


图 11 部分受压试件管口压缩变形的荷载-位移曲线(加载初期段)
Fig.11 Load-displacement of compression specimens (initial loading period)

性;而设置了加劲肋的 JD9-H120-T08-RY-T 的初始刚度明显大于其他试件,但由于其节点承载力高于杆件焊缝承载力,故当发生杆件焊缝拉裂破坏时,管壁基本还处于弹性阶段,塑性发展不明显,筒

壁几乎没有可见变形.

图13给出所有强轴受弯试件的中点竖向挠度

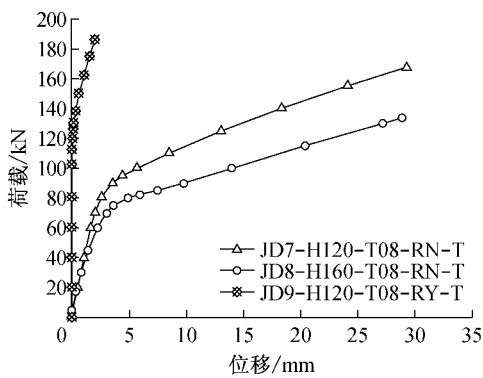


图 12 受拉试件孔口拉伸变形的荷载-位移曲线
Fig. 12 Load-displacement of tension specimens

的实测荷载-挠度曲线。图中,横轴代表中点竖向挠度,纵轴为荷载;中点竖向挠度根据位移计 $D_1 \sim D_4$ 的读数计算得到,中点竖向挠度 = $(D_1 \text{ 位移} + D_2 \text{ 位移} - D_3 \text{ 位移} - D_4 \text{ 位移}) / 2$ 。从图 13 可以看出,螺栓球柱节点具有较好的强轴受弯承载能力。在加载初期荷载-挠度曲线基本为直线,随着荷载的增加,孔壁逐渐进入塑性,刚度逐渐降低。JD11-H160-T12-RY-SB 由于设置了加劲肋且壁厚较厚,其强轴受弯承载能力明显高于 JD10-H140-T08-RN-SB,但塑性相对较差。从图中也可以看出两者的初始刚度相差不多,这主要是因为节点在绕强轴弯矩作用下,杆件端板和管口外壁之间有张开的趋势,此时的抗弯刚度主要取决于螺栓的刚度,而和是否设置加劲肋关系不大。

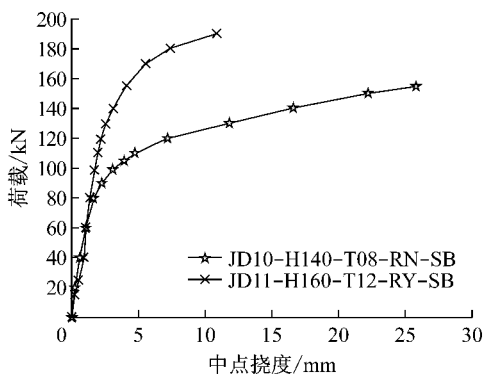


图 13 强轴受弯试件荷载-中点挠度曲线
Fig. 13 Load-deflection of strong-axis bending specimens

图 14 给出所有弱轴受弯试件的中点竖向挠度的实测荷载-挠度曲线。图中,横轴代表中点竖向挠度,纵轴为荷载;中点竖向挠度根据位移计 $D_1 \sim D_4$ 的读数计算得到,中点竖向挠度 = $(D_1 \text{ 位移} + D_2 \text{ 位移} - D_3 \text{ 位移} - D_4 \text{ 位移}) / 2$ 。从图 14 可以看出,螺栓球柱节点具有一定的弱轴受弯承载能力,但是较其他受力状态承载能力弱,曲线较早进入了非线性。随

着荷载的增加,孔壁逐渐进入塑性,刚度逐渐降低。

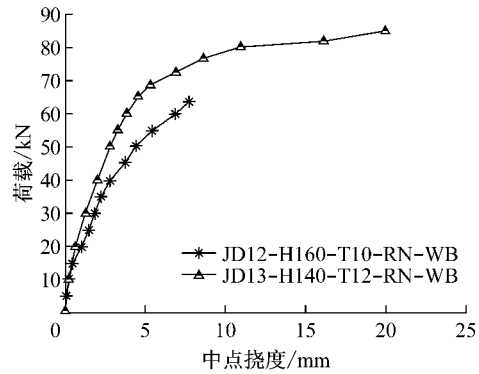


图 14 弱轴受弯试件荷载-中点挠度曲线
Fig. 14 Load-deflection of weak-axis bending specimens

4.2 实测荷载-应变曲线

图 15 给出了受压试件 JD3-H120-T12-RN-C 孔口实测荷载-应变曲线。从图中可知曲线出现了两次转折。加载初期,由于千斤顶从试件上端施加荷载,位于试件水平轴线上部的 S_{A1}, S_{A2} 处主要为压应变,位于试件水平轴线下部的 S_{A3}, S_{A4} 处主要为拉应变。加载中期,管口钢材开始屈服,刚度逐渐下降,管口竖向相对压缩位移增大的同时水平方向相对扩张,因而测点处受到一定拉应力,产生第一个转折。加载后期,由于杆件连接处内、外垫板的存在使管口变形受到一定限制,受力杆向中心挤压,管口测点处受到压应力,产生第二个转折,此时管口变形快速增大。

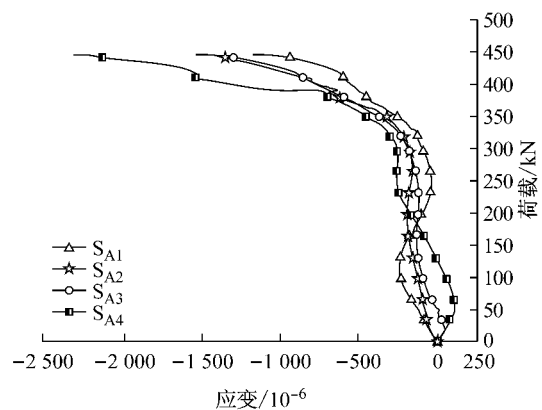


图 15 JD3-H120-T12-RN-C 荷载-应变曲线
Fig. 15 Load-strain of specimen JD3-H120-T12-RN-C

图 16 给出了受拉试件 JD7-H120-T08-RN-T 管口实测荷载-应变曲线。图中曲线同样转折了两次。加载初期,试件处在弹性阶段,荷载-应变曲线基本为线性增长。加载中期,试件进入塑性阶段,刚度逐渐下降,出现第一个转折。加载后期,管口变形快速增大,荷载-应变曲线出现第二个转折,直到焊缝

出现拉裂破坏。

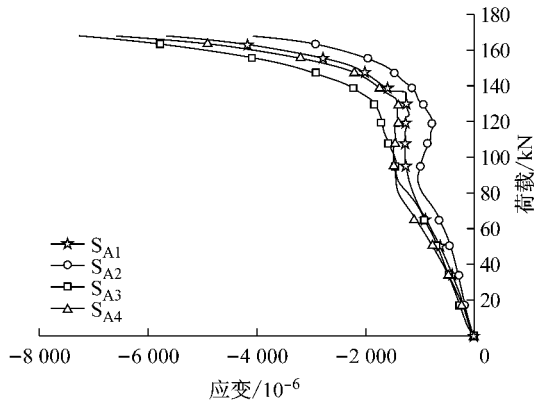


图 16 JD7-H120-T08-RN-T 荷载-应变曲线

Fig. 16 Load-strain of specimen JD7-H120-T08-RN-T

从图 15 和图 16 还可以看出,在单向压力和拉力作用下,圆柱筒壁的应力以环向应力为主;在整个加载过程中,各测点处的环向应力之间差异不大,应力应变的发展趋势基本一致。

图 17 给出了强轴受弯试件 JD10-H140-T08-RN-S 管口实测荷载-应变曲线。从图中可知,整个加载过程中应变片主要为压应变。加载初期,试件处在弹性阶段,荷载-应变曲线呈现出良好的线性。加载后期,螺栓附近管壁屈服,管口变扁,应变加速增长。

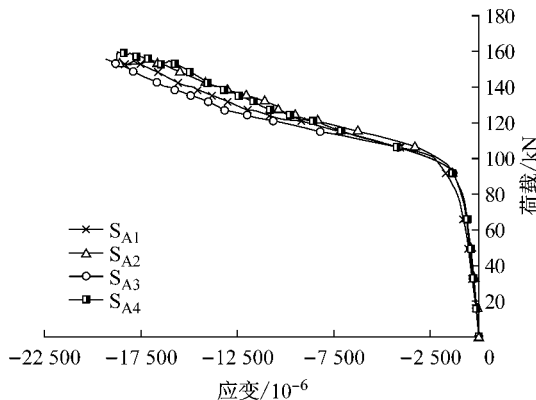


图 17 JD10-H140-T08-RN-SB 荷载-应变曲线

Fig. 17 Load-strain of specimen JD10-H140-T08-RN-S

图 18 给出了弱轴受弯试件 JD13-H140-T12-RN-WB 管口实测荷载-应变曲线。从图中可知,加载初期,在弯矩作用下位于试件水平轴线上部的 S_{A1} , S_{A2} 处主要呈压应变,位于试件水平轴线下部的 S_{A3} , S_{A4} 处主要呈拉应变。加载后期, S_{A3} , S_{A4} 处逐渐转折,试件下部受到压应力。

从图 17 和图 18 还可以看出,在弯矩作用下,圆柱筒壁的应力以同样以环向应力为主;在整个加载过程中,强轴受弯各测点处的环向应力之间差异不

大,应力应变的发展趋势基本一致,但弱轴受弯不同测点的环向应力有较大的差异。

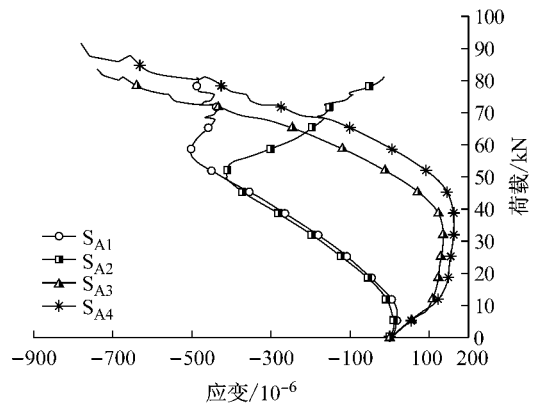


图 18 JD13-H140-T12-RN-WB 荷载-应变曲线

Fig. 18 Load-strain of specimen JD13-H140-T12-RN-W

5 结论

本文在传统网架螺栓球节点的基础上,研发了一种可用于无檩网架的新型节点——螺栓球柱节点。完成了 13 个螺栓球柱节点的承载力试验,通过试验可得出如下结论:

(1) 螺栓球柱节点在不同的受力模式下主要有圆柱筒壁压扁破坏、圆柱筒壁冲切破坏、螺栓拔出破坏、焊缝拉裂破坏等 4 种破坏模式。单向受压试件主要发生管口变形过大的圆柱筒壁压扁破坏;但是当圆柱部分直径较大、孔壁较薄时可能在连接杆件处发生冲切破坏,此类破坏为脆性破坏,实际工程中应尽量避免。对单向受拉试件主要破坏模式为焊缝拉裂破坏及螺栓拔出破坏。受弯试件则主要为螺栓拔出破坏。

(2) 当螺栓球柱节点承受单向压力或拉力时,设置加劲肋能大幅提高节点的刚度和承载力。在强轴受弯时,设置加劲肋仅对节点的承载能力有提高,但对节点的刚度影响不大。

(3) 螺栓球柱节点的壁厚越厚,其刚度越大,承载能力越高。

(4) 在单向压力和拉力作用下,圆柱筒壁的应力以环向应力为主;在整个加载过程中,各测点处的环向应力之间差异不大,应力应变的发展趋势基本一致。

参考文献:

[1] 刘锡良. 国内外空间结构节点综述[C] // 第九届空间结构学

- 术会议论文集. 北京:地震出版社,2000:10-18.
- LIU Xiliang. Overview of domestic and international spatial structure joint[C] // Proceedings of the 9th Spatial Structure Academic Conference. Beijing: Seismological Press, 2000: 10-18.
- [2] 陈志华,吴锋,闫翔宇,等. 国内空间结构节点综述[J]. 建筑科学,2007,23(9):93.
- CHEN Zhihua, WU Feng, YAN Xiangyu, *et al.* The state of arts: joints of space structures in China[J]. Building Science, 2007, 23(9): 93.
- [3] 刘锡良,陈志华. 网架焊接空心球节点破坏机理分析及承载能力试验研究[J]. 建筑结构学报,1994,14(3):38.
- LIU Xiliang, CHEN Zhihua. Analysis of collapse mechanism of welded hollow sphere joint in space trusses and experimental research of its bearing capacity [J]. Journal of Building Structures, 1994, 14(3): 38.
- [4] 秦东祺. 网架结构空心球节点的有限元研究[J]. 工程力学,1990,7(1):34.
- QIN Dongqi. Finite element investigation for hollow spherical joint of space turss[J]. Engineering Mechanics, 1990, 7(1): 34.
- [5] 周安,完海鹰. 网架结构新型节点单向受压的试验研究[J]. 合肥工业大学学报,1992,15(4):112.
- ZHOU An, WAN Haiying. An experimental study on a new type of joint in space frame under one-way pressure[J]. Journal of Hefei University of Technology,1992,15(4):112.
- [6] 周安,完海鹰. 网架新型节点受拉的试验研究[J]. 合肥工业大学学报,1993,16(3):105.
- ZHOU An, WAN Haiying. An test study on a new kind of tensile joint of space frame[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1993, 16(3): 105.
- [7] 郭建营,完海鹰. 一种新型空心球节点的试验研究[J]. 建筑结构,1998,19(8):114.
- GUO Jianying, WAN Haiying. Experimental research on a new hollow cylinder-ball joint[J]. Building Structure,1998,19(8):114.
- [8] 王先铁,郝际平,钟炜辉,等. 一种新型网壳结构节点的实验研究与有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2005,37(3):316.
- WANG Xiantie, HAO Jiping, ZHONG Weihui, *et al.* Experimental research and finite element analysis on a new joint of reticulated shells[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science, 2005, 37(3): 316.
- [9] 陈志华,孙国军,王小盾,等. 一种无檩螺栓球节点网架结构:中国,2010105121343[P]. 2010-10-20.
- CHEN Zhihua, SUN Guojun, WANG Xiaodun, *et al.* Non-purlin gird structure of bolted-ball joints: China, 2010105121343[P]. 2010-10-20.
- [10] 彭礼,郭小农. 网架结构:中国,2013201723390[P]. 2013-04-08.
- PENG Li, GUO Xiaonong. Non-purlin gird structure of bolted-ball-cylinder joints: China, 2013201723390[P]. 2013-04-08.

• 下期文章摘要预报 •

软黏土中静压沉桩引起的侧向挤土位移分析

张亚国,李镜培

将软黏土中桩体贯入过程看作不排水条件下圆柱孔的扩张. 弹性和塑性区分别采用小应变和大应变理论,考虑传统超固结比与各项同性超固结比的不同,推导了修正剑桥模型土中单桩挤土位移的解析解;并与文献离心模型试验结果进行了比较,验证了理论解答的可靠性. 在此基础上,采用叠加原理对排桩的侧向挤土位移进行了估算,并分析了沉桩数目、桩间距、预钻孔孔径以及土体超固结比对侧向挤土位移的影响规律. 研究表明,随着沉桩数目的增加,挤土影响范围增大;当桩间距、预钻孔孔径增大时,挤土位移快速减小;土体超固结比增加时,侧向挤土位移略有增加,但总体影响不明显.