

螺栓球柱节点单向受弯性能有限元分析

郭小农^{1†}, 曾强¹, 黄泽韡¹, 彭礼², 陈宇¹

(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:为研究螺栓球柱节点的受弯性能, 基于 2 个单向受弯节点试验, 采用 ABAQUS 建立了螺栓球柱节点的有限元模型, 得到了节点的破坏模式、螺栓内力及荷载-位移曲线。通过对比发现, 数值分析结果与试验结果吻合良好, 验证了数值模型的可靠性。随后对螺栓球柱节点的数值模型进行了合理简化, 并分析了正、负弯矩作用下节点的受力特性。建立了 46 个数值模型, 对影响螺栓球柱节点受弯性能的因素进行了详细的参数分析。结果表明, 增大圆柱筒壁直径及壁厚可显著提高节点的受弯性能; 节点的抗弯刚度及承载力随杆件宽度、弧形垫片厚度、螺栓尺寸及间距的增加而提高, 且节点受正弯矩时提高更为明显; 设置加劲肋可显著提高节点受弯性能。

关键词:螺栓球柱节点; 半刚性节点; 有限元分析; 参数分析; 抗弯刚度

中图分类号: TU395

文献标志码: A

Numerical Study on Flexural Behavior of Bolted Ball-cylinder Joint

GUO Xiaonong^{1†}, ZENG Qiang¹, HUANG Zewei¹, PENG Li², CHEN Yu¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai T&D Architectural Technology Co, Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to investigate flexural behaviors of the bolted ball-cylinder (BBC) joint, based on 2 tests on joints under one-way bending moment, finite element (FE) model was developed in ABAQUS. Failure modes, bolt internal forces as well as the load-displacement curves of the joints were obtained. By comparison, it was found that the numerical results agreed well with the experimental results, verifying the reliability of the FE model. Subsequently, joint model under bending moment was simplified and the mechanical behaviors of joint under positive and negative moments were discussed. In the parametric study, 46 FE models were established to investigate the effects of different parameters on flexural behaviors of the BBC joint. The results indicate that increasing the diameter and thickness of the hollow cylinder can improve the flexural behavior of the BBC joint significantly; while the bearing capacity and stiffness of the BBC joint increase with the increase of rectangular tube width, washer thickness, size and interval of the bolts, and the effects will be more obvious when positive moment is applied to the joint. Besides, the ribbed stiffness can improve flexural behavior of the BBC joint greatly.

Key words: bolted ball-cylinder joint; semi-rigid joint; finite element analysis; parametric analysis; bending stiffness

* 收稿日期: 2019-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908168, 51478335), National Natural Science Foundation of China(50908168, 51478335)

作者简介: 郭小农(1977—), 男, 四川金堂人, 同济大学副教授, 工学博士

† 通讯联系人, E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

我国现行规范《空间网格结构技术规程》(JGJ7—2010)^[1]规定:对于网架结构和双层网壳结构,可采用空间铰接杆系结构进行分析,节点假定为铰接;对于单层网壳结构,可采用空间刚接梁系结构进行分析,节点假定为刚接.但现有研究表明,大多数空间网格结构的节点实际上是半刚性节点,且节点刚度对结构的力学性能有很大影响.王星、完海鹰等^[2-4]通过数值分析计算,回归得出了焊接球节点弯曲刚度的计算式,并在网架分析过程中考虑了节点刚度的影响,结果表明网架内力受节点刚度影响较小而挠度受节点刚度影响较大.Lopez等^[5-6]、张竞乐等^[7]、康菊等^[8]通过试验研究和有限元模拟,分析了不同节点刚度对单层网壳稳定性的影响,研究发现节点刚度对结构的整体稳定性有较大影响.因此,对空间网格结构的节点刚度及其对结构性能影响的研究具有重要意义.

螺栓球柱节点是彭礼等^[9]提出的一种适用于无檩网架结构的新型节点.典型的螺栓球柱节点由空心圆柱筒体和实心螺栓半球两部分等强焊接而成,必要时可在筒体开口处增设环形加劲肋,以提高节点的刚度及承载力.对于采用该节点的无檩网架,上弦杆可采用矩形管截面,并通过弧形端板、高强螺栓、弧形垫片等部件与节点体紧密连接;腹杆可采用圆管截面,并与实心半球连接.由于上弦杆为矩形管,抗弯刚度较大,因此结构无需再设置支托和檩条,而将屋面板直接支承于上弦杆表面,具有节约材料、方便施工的优点,并可获得良好的建筑效果.

与传统网架节点相比,对螺栓球柱节点受力性能的研究相对较少.目前仅郭小农等^[10-11]对螺栓球柱节点的受压、受拉及受弯性能进行了试验研究,初步得到了节点在不同受力状态下的破坏模式、应力分布规律及承载力特征;随后通过数值模拟详细分析了单向受压节点的力学特性,提出了螺栓球柱节点单向受压承载力的计算式.然而,螺栓球柱节点是半刚性节点,在轴向受力时会存在荷载偏心现象,使节点承受较大的次弯矩.上述研究主要针对螺栓球柱节点的轴向受力性能进行,缺乏对节点受弯性能的深入研究.

本文在文献[10]中节点受弯试验的基础上,建立了单向受弯螺栓球柱节点的数值分析模型,并将数值分析结果与试验结果进行对比,验证了数值模型的可靠性.随后对受弯节点模型进行了合理简化,并对影响螺栓球柱节点受弯性能的因素进行了详细的参数分析,得到了节点抗弯刚度的主要影响因素.

1 试验简介

1.1 试件设置及材料性能

郭小农等^[10]共进行了2个足尺单向受弯节点的静力试验.试件详图如图1所示,具体几何尺寸见表1.每个球柱节点均与4根矩形钢管连接,杆件截面规格均为120×60×5(单位为mm),相邻杆件夹角为90°.为方便加载,各杆件端部均焊接矩形端板,并在实心半球上焊接圆管及正方形端板.杆件及节点的材料牌号均为Q235B,焊缝采用E43焊条等强焊接,所有螺栓均采用10.9级的M20螺栓.

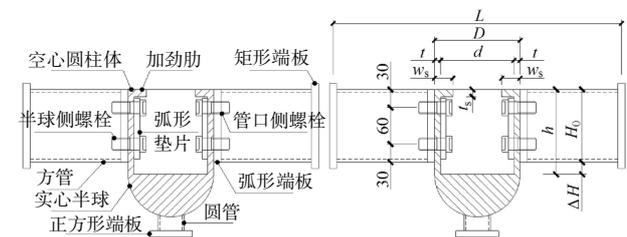


图1 试件详图

Fig.1 Configurations of the specimen

杆件及节点的材料性能由拉伸试验测定,试验前从圆柱体的芯部取样制作了6个材料拉伸试样,最终得到试件节点区材料的力学性能平均值为:弹性模量 $E=2.095 \times 10^5$ MPa,屈服强度 $f_y=215.67$ MPa,抗拉强度 $f_u=449.73$ MPa,断后伸长率 $\delta_5=31.13\%$,最大荷载下总延伸率 $A_{gt}=19.40\%$.

表1 螺栓球柱节点试件几何尺寸

Tab.1 Dimensions of BBC joint specimens

试件编号	L/mm	$(D/\text{mm})/(d/\text{mm})$	h/mm	t/mm	$w_s \times t_s / (\text{mm} \times \text{mm})$
JD1	428	160/144	140	8	—
JD2	408	140/116	160	12	20×12

注: D 为圆柱外径; d 为圆柱内径; h 为圆柱高度; t 为圆柱壁厚; w_s 为加劲肋宽度; t_s 为加劲肋厚度.

1.2 加载方式及测点布置

螺栓球柱节点用于无檩网架上弦,主要承受压力.研究发现螺栓球柱节点是一种半刚性节点,承载变形后轴力可能发生偏心,产生不可忽略的次弯矩.因此对节点施加单向弯矩,以研究节点的受弯性能.加载方式见图2(a),在实心半球上焊接圆管及加载板以便于施加荷载,弯矩通过作用在加载板上的荷载产生.测点布置见图2(b),节点的竖向挠度值可由位移计 $D_1 \sim D_4$ 的读数按式(1)计算得出.

$$f = (\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 - \delta_4) / 2. \quad (1)$$

式中: f 为单向受弯节点的中心挠度,mm; $\delta_1 \sim \delta_4$ 为位

移计 $D_1 \sim D_4$ 的读数, mm.

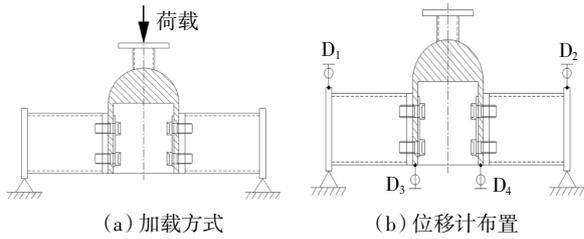


图 2 加载方式及测点布置
Fig.2 Loading scheme and measurement arrangement

1.3 试验结果及分析

试验完成后拆卸试件进行观察, 试件的破坏模式和极限荷载见表 2. 试件的主要破坏模式为螺栓拔出破坏. 对于无肋试件 JD1, 圆柱筒壁在管口处沿受力方向明显扩张, 在垂直受力方向收缩, 而在靠近半球处变形较小; 受弯杆靠近管口侧的螺栓发生拔出, 弧形端板与筒壁明显脱开, 靠近半球侧的筒壁则有受杆件挤压留下的凹痕. 对于带肋试件 JD2, 破坏时圆柱筒壁未见明显变形, 节点刚度和承载力显著提高, 除发生螺栓拔出外, 受力杆与弧形端板间的焊缝发生撕裂.

表 2 试验结果汇总
Tab.2 Test results

试件编号	破坏现象	极限荷载/kN
JD1	螺栓拔出, 筒壁变形过大	161.00
JD2	螺栓拔出, 筒壁变形不明显	190.30

2 数值模型的建立

2.1 模型几何尺寸及构造

采用有限元软件 ABAQUS 建立了节点的数值分析模型. 模型的几何尺寸和构造细节均与试件相同. 基于试件几何构造、荷载情况及边界条件的对称性, 采用 1/4 模型模拟受弯试件, 并设置对称边界条件. 为模拟试验中试件的实际边界条件, 在数值模型中建立了加载垫板, 数值分析模型如图 3(a)所示.

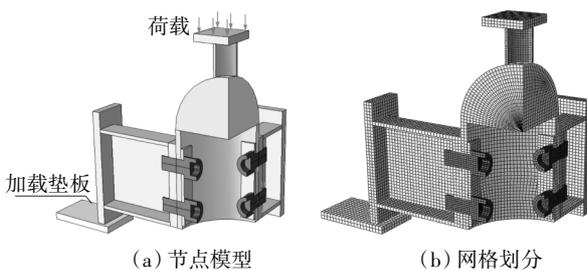


图 3 螺栓球柱节点有限元模型
Fig.3 FE models of bolted ball-cylinder joint

2.2 接触关系设置

数值分析模型的接触对设置见表 3. 为模拟螺栓拔出破坏, 螺栓杆与弧形端板螺栓孔的接触对设置为表面与表面接触, 并在过盈量设置中选择“计算单线螺栓”, 线半角设置为 30° , 螺距设置为 1.5 mm. 受力杆矩形端板与加载垫板的接触面法向设置为硬接触, 切向设置为罚摩擦, 摩擦因数取 0.2, 如图 4(a)所示. 需要说明的是, 为避免施加螺栓预紧力时矩形端板与加载垫板的接触面上产生不应存在的摩擦力, 该接触对在施加完螺栓预紧力后激活, 这与试件的实际装配过程相符. 圆管与实心半球及加载端板的接触面均设置为绑定, 以模拟等强焊接, 如图 4(b)(c)所示.

表 3 数值分析模型接触对设置

Tab.3 Setting of contact pairs of FE models

接触对	相互作用类型	主面	从面
加载垫板与受弯杆矩形端板	表面与表面接触	加载垫板	矩形端板
弧形端板与节点筒壁	表面与表面接触	节点筒壁	弧形端板
弧形垫片与节点筒壁	表面与表面接触	节点筒壁	弧形垫片
螺栓头与弧形垫片	表面与表面接触	弧形垫片	螺栓头
螺栓杆与弧形垫片螺栓孔	表面与表面接触	螺栓螺杆	弧形垫片螺栓孔
螺栓杆与节点筒壁螺栓孔	表面与表面接触	螺栓螺杆	节点筒壁螺栓孔
螺栓杆与弧形端板螺栓孔	表面与表面接触	螺栓螺杆	弧形端板螺栓孔
圆管与节点实心半球	绑定	实心半球	圆管
圆管与方形加载端板	绑定	方形端板	圆管

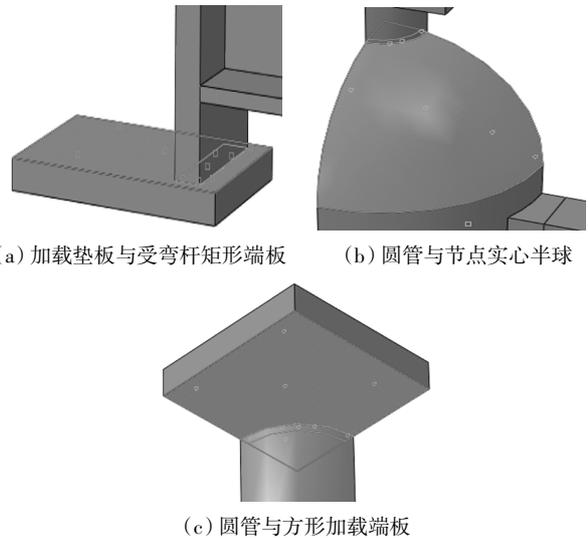


图 4 数值分析模型接触对设置

Fig.4 Setting of contact pairs of FE models

2.3 网格划分

由于数值模型中接触对数量较多,且接触面多为圆弧面,因此计算结果对网格划分比较敏感.对于三维实体,使用结构化网格划分技术或扫掠网格划分技术得到的六面体网格精度较高.通过对比分析,采用非协调单元 C3D8I 建立数值模型,可克服剪切自锁问题,并获得精确的计算结果.数值分析模型的网格划分如图 3(b)所示.

2.4 荷载施加与分析步建立

数值分析模型采用位移加载,加载面设置在加载端板上,如图 4(a)所示.共设置 6 个分析步,具体操作如下.

Step1:设置临时约束固定节点、弧形垫片与杆件,同时施加 10 N 的螺栓预紧力;

Step2:保持螺栓预紧力不变,释放临时约束;

Step3:将螺栓预紧力调整为 10 000 N;

Step4:将螺栓预紧力由“施加螺栓荷载”改为“固

定在当前长度”;

Step5:激活加载垫板与受弯杆矩形端板间的接触;

Step6:施加位移荷载.

3 数值分析与试验结果的对比

3.1 破坏模式对比

数值分析模型的破坏模式如图 5 和图 6 所示,可以发现数值分析结果与试验结果吻合良好.无肋模型 JD1 较好地模拟出了管口处筒壁的受拉扩张及弧形端板与筒壁的脱开现象;由于受到弧形端板边缘的挤压,靠近实心半球侧的筒壁出现了明显的应力集中现象,如图 5 所示.带肋模型 JD2 的刚度较大,筒壁变形相对较小,如图 6 所示.此外,受力杆与弧形端板连接处有应力集中现象,与试验中焊缝开裂相吻合.

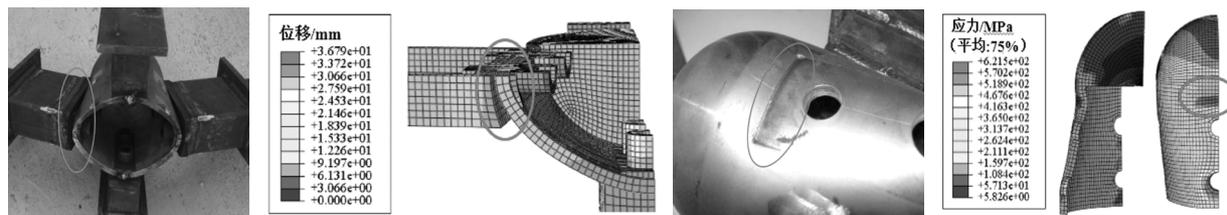


图 5 JD1 试验及数值分析所得的破坏模式

Fig.5 Failure modes of tested specimen JD1 and its FE model

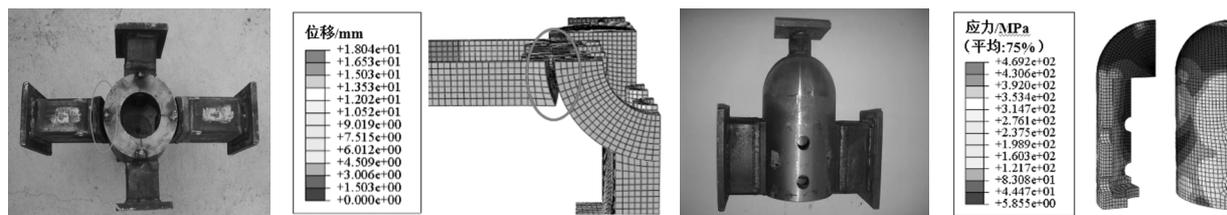


图 6 JD2 试验及数值分析所得的破坏模式

Fig.6 Failure modes of tested specimen JD2 and its FE model

3.2 螺栓内力对比

节点受弯时,管口侧杆件拉力通过弧形端板传至螺栓,再由螺栓经垫片传至节点筒壁,因此螺栓是主要受力部件之一.虽然试验中未测得螺栓内力的具体数值,但螺栓内力的变化可在数值模型中进行验证.

以 JD1 为例,受力侧 2 颗螺栓的螺栓内力-分析步时间曲线如图 7 所示.在第 1、2 步平稳建立各接

触关系,螺栓内力几乎维持为零;在第 3 步施加螺栓预拉力,螺栓内力随时间线性增加至预设值;在第 4、5 步固定螺栓长度,并激活加载垫板与矩形端板之间的接触,螺栓内力维持不变;在第 6 步施加位移荷载,螺栓内力逐渐增加.由于弧形端板以靠近半球侧边缘为支点旋转,管口侧螺栓距离旋转中心的距离更远,故其内力与变形大于实心半球侧螺栓,如图 7 和图 8 所示.

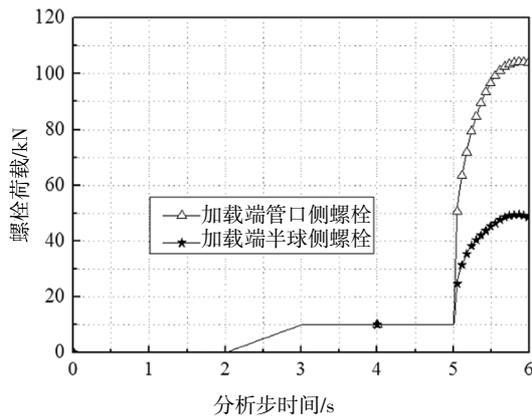


图 7 螺栓内力-分析步时间曲线

Fig.7 Internal force of the bolts-step time curves

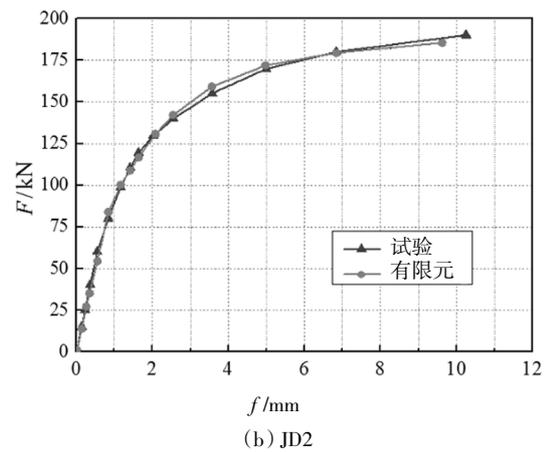


图 9 荷载-位移曲线对比

Fig.9 Comparisons on load-displacement curves

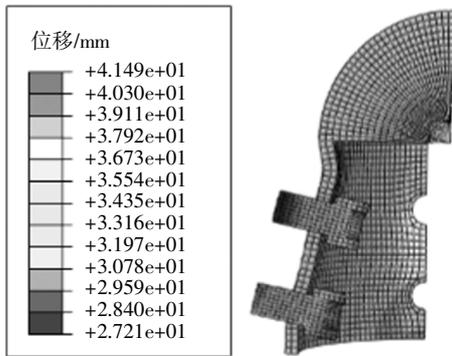
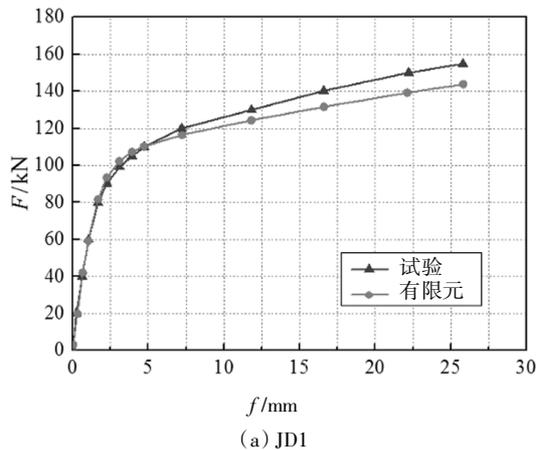


图 8 螺栓最终变形情况

Fig.8 Final deformation of the bolts

3.3 荷载-中点挠度曲线对比

图 9 对比了螺栓球柱节点试验和数值分析的荷载-中点挠度曲线. 通过对比发现, 数值分析得到的荷载-中点挠度曲线与试验曲线吻合良好. 试件 JD2 的两条曲线几乎重合, 如图 9(b)所示; 试件 JD1 的数值曲线虽然在加载后期偏低, 但误差仍在可接受范围内, 且数值曲线和试验曲线在弹性阶段和刚进入塑性阶段几乎重合, 如图 9(a)所示.



(a) JD1

4 数值模型简化及受力分析

4.1 受弯节点数值模型简化

根据螺栓球柱节点轴向受力性能可知^[4], 杆件受轴力时, 荷载存在偏心现象, 节点中将产生较大的次弯矩, 刚度矩阵存在耦合项. 为消除轴力对节点刚度的影响, 确定螺栓球柱节点受弯性能的影响参数, 在进行详细的参数分析前, 对数值模型进行了简化.

简化后的数值模型如图 10(a)所示, 将原模型中的杆件、实心半球处的圆管及相应的端板删去, 仅保留球柱节点、高强螺栓、弧形垫片及弧形端板, 并保持各接触关系不变. 同时建立参考点, 将弧形端板外侧面上各结点的自由度与参考点耦合, 如图 10(b)所示. 在参考点上设置转角位移荷载进行加载, 如图 10(c)所示.

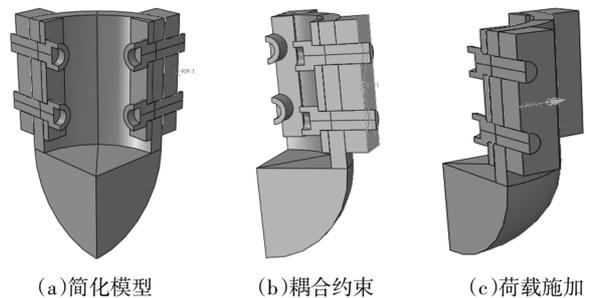


图 10 螺栓球柱节点简化数值模型

Fig.10 Simplified FE model of the BBC joint

4.2 正、负弯矩作用下节点受力分析

螺栓球柱节点单向受压和单向受拉时产生的次弯矩方向相反, 可定义节点单向受压时产生的次弯矩为正, 单向受拉时产生的次弯矩为负, 如图 11 所示. 选取典型节点模型 LZ120-90-10(具体尺寸见表

4),分别施加正、负弯矩,得到了节点最终变形情况
及受力侧螺栓内力-分析步时间曲线,如图12和图
13所示.

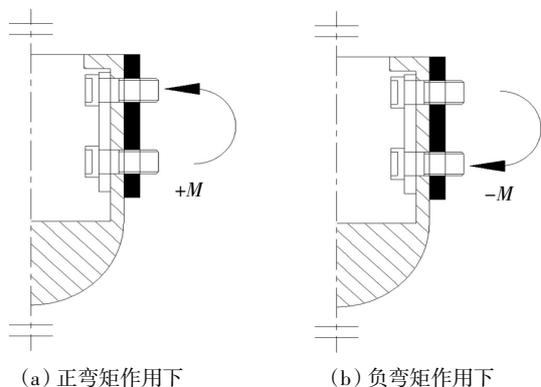


图11 节点受力简图
Fig.11 Force diagram of the joint

由图12(a)可知,在正弯矩作用下,弧形端板绕
两颗螺栓连线的中点旋转,管口侧螺栓受压,螺栓内
力随荷载增加而下降;半球侧螺栓受拉,螺栓内力随
荷载增加而上升,如图13(a)所示.由图12(b)可知,
在负弯矩作用下,弧形端板绕靠近半球侧边缘旋转,
两颗螺栓均受拉,螺栓内力随荷载增加而上升,且管
口侧螺栓内力大于半球侧螺栓内力,如图13(b)所示.

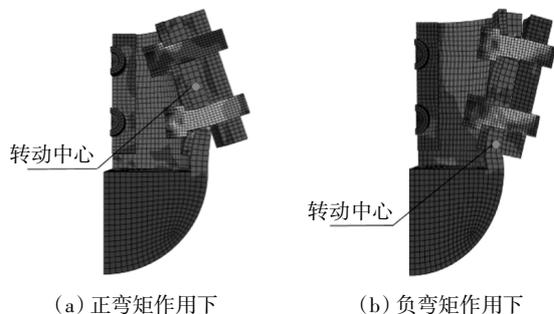
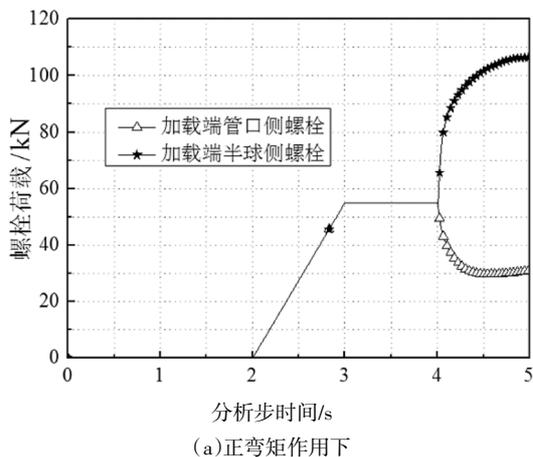
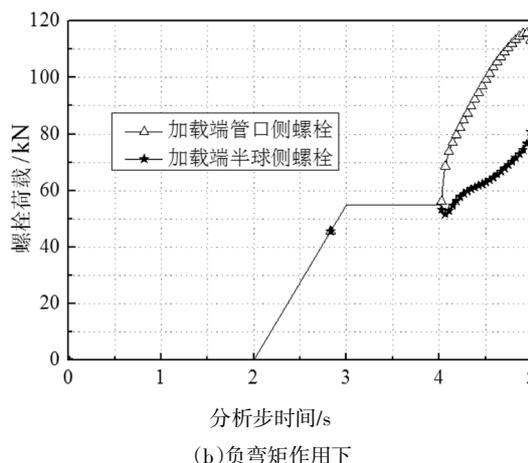


图12 节点最终变形
Fig.12 Final deformation of the joint



(a)正弯矩作用下



(b)负弯矩作用下
图13 LZ120-90-10中螺栓内力-分析步时间曲线
Fig.13 Internal force of the bolts-step time curves
for LZ120-90-10

节点在正、负弯矩作用下的弯曲-转角曲线如图
14所示.正、负弯矩作用下节点的初始抗弯刚度几乎
相同;随着荷载增加,节点抗弯刚度均明显下降,且
正弯矩作用下节点的抗弯刚度下降幅度更大.节点
受正弯矩作用时,管口处筒壁受压变形,节点的抗弯
刚度由圆柱筒壁的刚度控制,材料进入塑性后节点
的刚度将很快下降至接近于零;节点受负弯矩作用
时,实心半球对筒壁变形有约束作用,节点的抗弯刚
度由高强螺栓控制,在材料进入塑性后仍具有一定的
刚度.由于在正、负弯矩作用下节点受力性能存在
较大差别,因此在参数分析中考虑了正、负弯矩两
种情况.

4.3 节点抗弯承载力取值准则

由图14可知,螺栓球柱节点在正、负弯矩作用
下的破坏模式均为延性破坏,且由于材料的强化作
用,弯矩-转角曲线无明显下降段.根据欧洲规范^[12]
中对节点刚度分类的相关规定,螺栓球柱节点属于
半刚性节点,因此规定当节点刚度退化至规范规定
的半刚性节点刚度范围的下限值时,所对应的弯矩
值为节点的抗弯承载力,如图14所示.其中, $S_{mi,p}$
和 $M_{u,p}$ 分别为节点在正弯矩作用下的初始刚度和
抗弯承载力; $S_{mi,n}$ 和 $M_{u,n}$ 分别为节点在负弯矩作
用下的初始刚度和抗弯承载力; S_{pimed} 为欧洲规范
规定的半刚性节点刚度范围的下限值, $S_{pimed} = 0.5EI_b/L_b$, EI_b/L_b 为节点连接杆件的线刚度,杆件长度 L_b 取15倍截面高度.

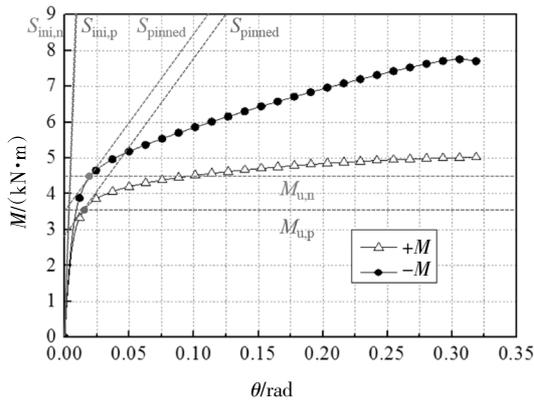


图 14 正、负弯矩作用下节点弯矩-转角曲线对比
Fig.14 Comparison on the moment-rotation curves of joints under positive and negative bending moments

5 节点受弯性能影响参数分析

为确定各项参数对螺栓球柱节点受弯性能的影响,建立了 46 个受弯节点数值模型,并对每个模型分别施加正、负弯矩.所有螺栓球柱节点数值模型的具体尺寸及正、负弯矩作用下节点的初始抗弯刚度见表 4.螺栓球柱节点试件编号为 LZD-h-t,其中 LZ 表示螺栓球柱节点,D、h、t 分别为螺栓球柱节点的外径、筒壁高度及壁厚,单位为 mm.同时,表 4 给出了建议的最小矩形管尺寸及配套螺栓尺寸.

表 4 数值模型几何尺寸及承载性能

Tab.4 Dimensions and bearing capacity of FE models for parametric studies

模型 序号	试件 编号	$H_0 \times b_r \times t_r /$ (mm×mm×mm)	配套 螺栓	w_w /mm	t_w /mm	e /mm	w_s /mm	t_s /mm	$S_{ini,p}$ /(kN·m·rad ⁻¹)	$S_{ini,n}$ /(kN·m·rad ⁻¹)	$M_{u,p}$ /(kN·m)	$M_{u,n}$ /(kN·m)
1	LZ100-130-8	120×50×5	2M16	36	6	60	—	—	1 150.9	1 214.1	5.811	6.625
2	LZ120-130-8	120×50×5	2M16	36	6	60	—	—	860.9	924.0	5.085	5.900
3	LZ140-130-8	120×50×5	2M16	36	6	60	—	—	739.6	786.5	4.727	5.722
4	LZ160-130-8	120×50×5	2M16	36	6	60	—	—	644.6	719.2	4.547	5.753
5	LZ160-120-12	120×60×5	2M16	36	6	60	—	—	1 267.0	1 397.7	8.605	10.556
6	LZ160-125-12	120×60×5	2M16	36	6	60	—	—	1 394.0	1 389.0	8.528	10.476
7	LZ160-130-12	120×60×5	2M16	36	6	60	—	—	1 350.0	1 369.7	8.461	10.283
8	LZ160-135-12	120×60×5	2M16	36	6	60	—	—	1 330.2	1 406.6	8.440	10.211
9	LZ160-140-12	120×60×5	2M16	36	6	60	—	—	1 360.3	1 326.1	8.428	10.165
10	LZ160-145-12	120×60×5	2M16	36	6	60	—	—	1 344.3	1 382.3	8.430	10.168
11	LZ160-150-12	120×60×5	2M16	36	6	60	—	—	1 303.0	1 351.9	8.419	10.093
12	LZ120-90-8	80×40×3	2M12	30	5	40	—	—	380.9	405.4	2.668	3.320
13	LZ120-90-10	80×40×3	2M12	30	5	40	—	—	543.4	580.4	3.562	4.453
14	LZ120-90-12	80×40×3	2M12	30	5	40	—	—	726.1	825.8	4.459	5.635
15	LZ120-90-14	80×40×3	2M12	30	5	40	—	—	956.6	1 075.1	5.239	6.269
16	LZ140-110-12	100×30×4	2M14	30	5	50	—	—	922.7	1 051.2	5.715	7.327
17	LZ140-110-12	100×40×4	2M14	30	5	50	—	—	963.8	1 130.2	6.017	7.549
18	LZ140-110-12	100×50×4	2M14	30	5	50	—	—	1 019.4	1 175.3	6.339	7.665
19	LZ140-110-12	100×60×4	2M14	30	5	50	—	—	1 109.5	1 178.3	6.644	7.726
20	LZ140-110-12	100×70×4	2M14	30	5	50	—	—	1 240.9	1 182.2	6.882	7.699
21	LZ140-110-12	100×80×4	2M14	30	5	50	—	—	1 216.2	1 228.8	7.077	7.731
22	LZ160-150-12	140×70×5	2M20	36	8	70	—	—	1 975.5	1 998.7	12.109	14.017
23	LZ160-150-12	140×70×5	2M20	42	8	70	—	—	1 998.1	2 096.5	12.154	14.318

续表 4:

模型 序号	试件 编号	$H_0 \times b_r \times t_r /$ (mm×mm×mm)	配套 螺栓	w_w /mm	t_w /mm	e /mm	w_s /mm	t_s /mm	$S_{ini,p}$ /(kN·m·rad ⁻¹)	$S_{ini,n}$ /(kN·m·rad ⁻¹)	$M_{u,p}$ (kN·m)	$M_{u,n}$ (kN·m)
24	LZ160-150-12	140×70×5	2M20	48	8	70	—	—	2 003.9	2 120.2	12.206	14.424
25	LZ160-150-12	140×70×5	2M20	54	8	70	—	—	2 005.0	2 112.7	12.222	14.415
26	LZ160-150-12	140×70×5	2M20	42	4	70	—	—	1 875.3	1 835.7	11.448	12.925
27	LZ160-150-12	140×70×5	2M20	42	6	70	—	—	1 931.5	1 913.1	11.799	13.529
28	LZ160-150-12	140×70×5	2M20	42	10	70	—	—	2 045.6	2 138.0	12.532	15.132
29	LZ180-150-14	140×70×5	2M16	42	8	70	—	—	1 945.2	2 200.8	13.237	16.430
30	LZ180-150-14	140×70×5	2M20	42	8	70	—	—	2 377.7	2 330.7	14.413	17.395
31	LZ180-150-14	140×70×5	2M22	42	8	70	—	—	2 417.7	2 408.2	14.890	17.945
32	LZ180-150-14	140×70×5	2M24	42	8	70	—	—	2 537.5	2 569.7	15.244	18.261
33	LZ180-150-14	140×70×5	2M27	42	8	70	—	—	2 548.0	2 639.3	15.803	18.648
34	LZ140-150-12	140×60×5	2M20	42	8	50	—	—	1 999.4	2 364.6	10.689	13.811
35	LZ140-150-12	140×60×5	2M20	42	8	60	—	—	2 002.9	2 301.2	11.577	14.266
36	LZ140-150-12	140×60×5	2M20	42	8	70	—	—	2 264.0	2 326.1	12.382	14.683
37	LZ140-150-12	140×60×5	2M20	42	8	80	—	—	2 462.3	2 354.3	13.163	14.850
38	LZ140-150-12	140×60×5	2M20	42	8	90	—	—	2 545.7	2 449.1	14.075	14.808
39	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	—	—	974.3	1 092.1	6.537	8.003
40	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	6	10	1 195.0	1 273.9	7.370	8.505
41	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	12	10	1 832.0	2 082.0	8.278	9.461
42	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	18	10	2 414.9	2 818.0	9.212	10.442
43	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	24	10	3 037.3	3 246.2	10.081	11.068
44	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	18	6	2 017.3	2 352.9	8.343	9.678
45	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	18	8	2 065.5	2 589.6	8.816	10.090
46	LZ140-130-10	120×50×5	2M16	36	6	60	18	12	2 399.9	2 789.8	9.574	10.734

注: H_0 、 b_r 、 t_r 分别为建议的最小矩形管的截面高度、宽度及厚度; w_w 为垫片宽度; t_w 为垫片厚度; e 为螺栓间距; w_s 为加劲肋宽度; t_s 为加劲肋厚度; $S_{ini,p}$ 为正弯矩作用下节点的初始抗弯刚度; $S_{ini,n}$ 为负弯矩作用下节点的初始抗弯刚度; $M_{u,p}$ 为正弯矩作用下节点的抗弯承载力; $M_{u,n}$ 为负弯矩作用下节点的抗弯承载力。

5.1 圆柱筒壁直径的影响

1~4号模型的弯矩-转角曲线如图15所示。由图15和表4可知,随着圆柱筒壁直径增加,节点的抗弯刚度下降。筒壁直径从100mm增长至160mm时,正、负弯矩作用下节点的初始抗弯刚度分别下降了44.0%和40.8%;抗弯承载力分别下降了21.8%和13.2%。但当筒壁直径 D 大于120mm时,筒壁直径对节点抗弯刚度及承载力的影响减小。

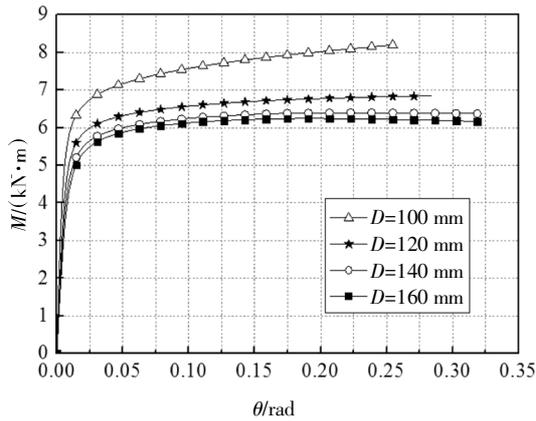
5.2 圆柱筒壁高度的影响

5~11号模型的弯矩-转角曲线如图16所示。由4.2节中的分析可知,正弯矩作用下,节点的抗弯刚度主要由筒壁的刚度控制;负弯矩作用下,节点的抗弯刚度主要由高强螺栓控制,因此筒壁高度对节点抗弯性能的影响可忽略不计。

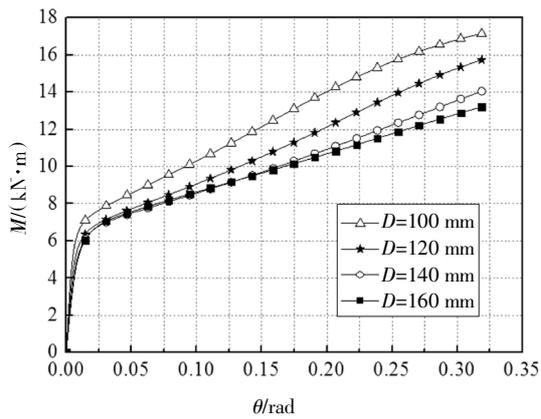
5.3 圆柱筒壁壁厚的影响

12~15号模型的弯矩-转角曲线如图17所示。当其他参数不变时,节点的抗弯刚度及承载力随着

圆柱筒壁厚增加而显著上升. 但需要注意, 当壁厚过大时, 筒壁的刚度过大, 节点破坏时筒壁变形很小, 可能发生螺栓拉断破坏, 节点延性明显下降; 当壁厚过小时, 在负弯矩作用下可能发生筒壁冲切破坏, 节点延性同样较低. 因此, 在实际工程中应对壁厚进行合理设计, 保证节点具有良好的延性, 避免节点发生脆性破坏.



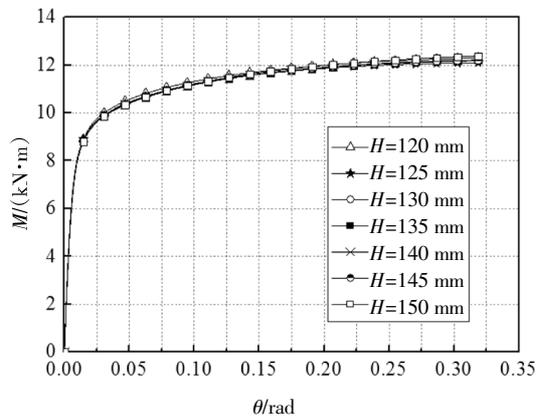
(a) 正弯矩作用下



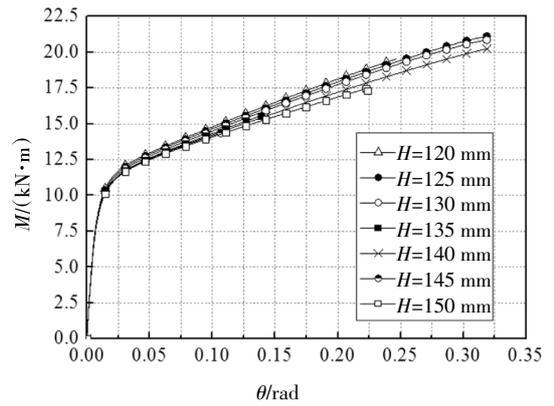
(b) 负弯矩作用下

图 15 圆柱筒壁直径的影响

Fig.15 Influence of the outside diameter of hollow cylinder



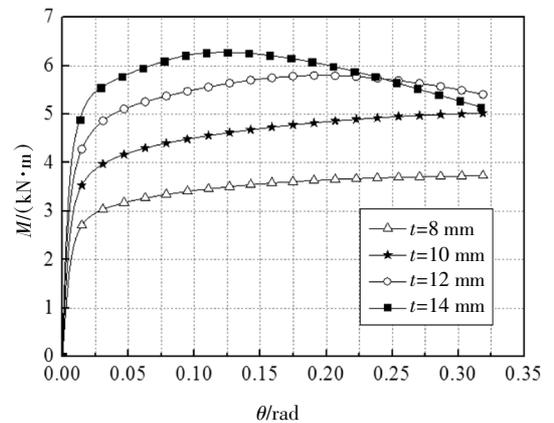
(a) 正弯矩作用下



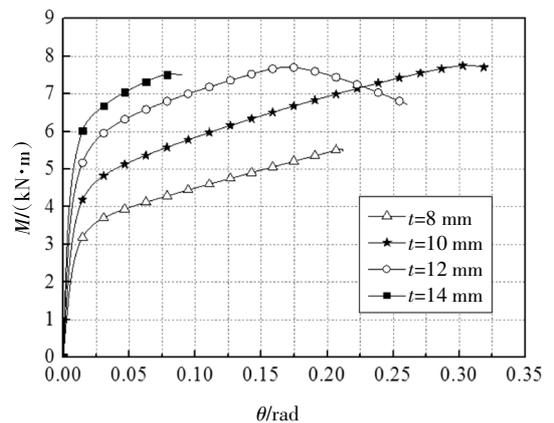
(b) 负弯矩作用下

图 16 圆柱筒壁高度的影响

Fig.16 Influence of the hollow cylinder height



(a) 正弯矩作用下



(b) 负弯矩作用下

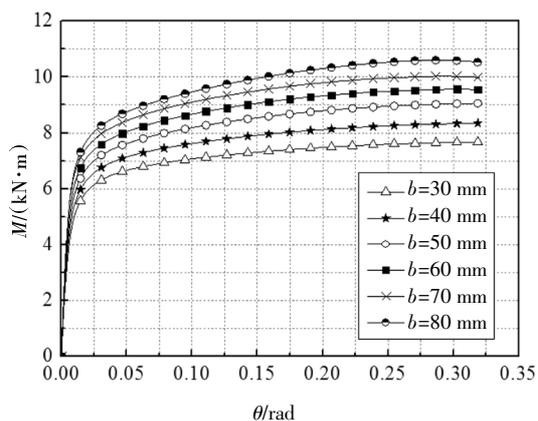
图 17 圆柱筒壁厚度的影响

Fig.17 Influence of the hollow cylinder thickness

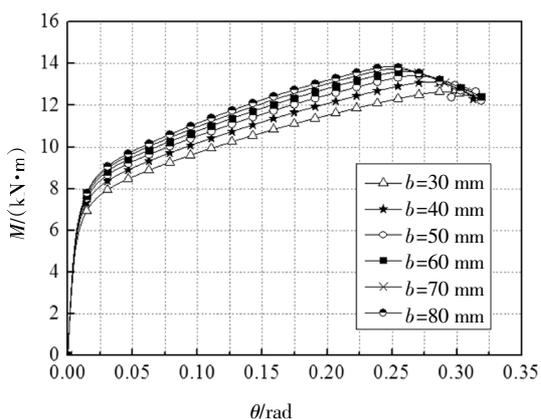
5.4 杆件宽度的影响

16~21 号模型的弯矩-转角曲线如图 18 所示. 由表 4 可知, 杆件宽度从 30 mm 增长至 80 mm 时, 正、负弯矩作用下节点的初始抗弯刚度分别上升了

31.8%和 16.9%；抗弯承载力分别上升了 23.8%和 5.5%。正弯矩作用下杆件宽度对节点受弯性能的影响更为明显。这是由于正弯矩作用下，弧形端板对筒壁变形有约束作用，随杆件宽度增大，筒壁可变形段长度减小，节点刚度明显上升；而负弯矩作用下，弧形端板与筒壁脱开，杆件宽度的影响较小。



(a) 正弯矩作用下



(b) 负弯矩作用下

图 18 杆件宽度的影响

Fig.18 Influence of the rectangular tube width

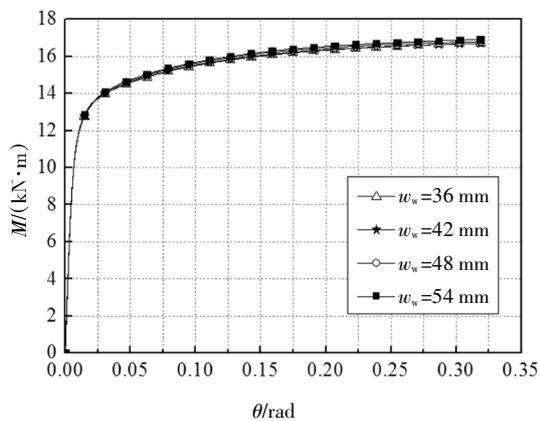
5.5 弧形垫片宽度的影响

22~25 号模型的弯矩-转角曲线如图 19 所示。当其他参数不变时，正、负弯矩作用下节点的抗弯刚度及承载力几乎不受弧形垫片宽度的影响，各曲线几乎重合。因此，在设计时弧形垫片宽度仅需满足构造要求即可。

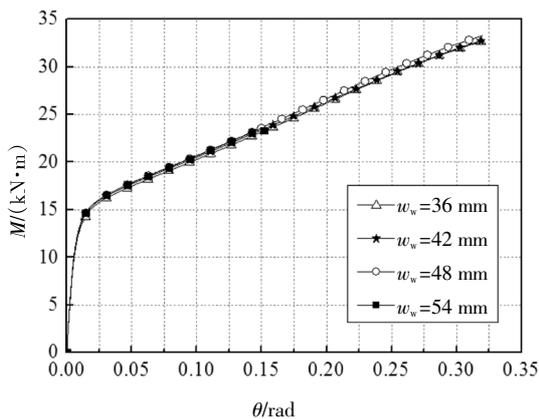
5.6 弧形垫片厚度的影响

23、26~28 号模型的弯矩-转角曲线如图 20 所示。弧形垫片厚度对节点的抗弯刚度及承载力有一定影响，垫片厚度从 4 mm 增长至 10 mm 时，正、负

弯矩作用下节点的初始抗弯刚度分别上升了 9.1%和 16.5%；抗弯承载力分别上升了 9.5%和 17.7%。由于垫片与筒壁通过高强螺栓连接，在正、负弯矩作用下两者共同发生弯曲变形(如图 12 所示)，故增大垫片厚度可提高筒壁的抗弯刚度。



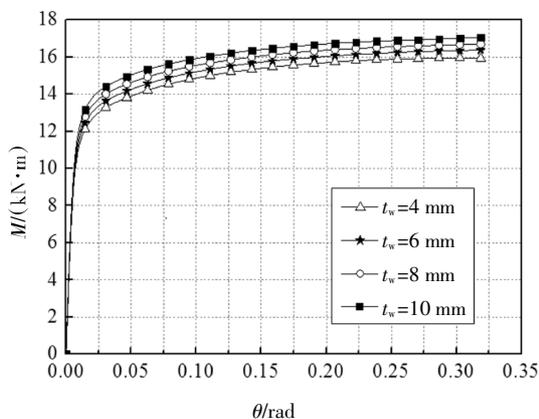
(a) 正弯矩作用下



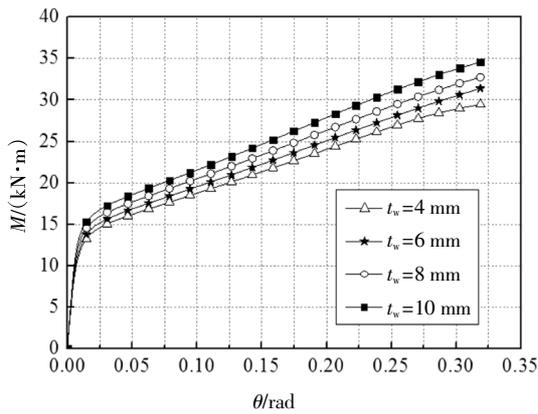
(b) 负弯矩作用下

图 19 弧形垫片宽度的影响

Fig.19 Influence of the convex washer width



(a) 正弯矩作用下



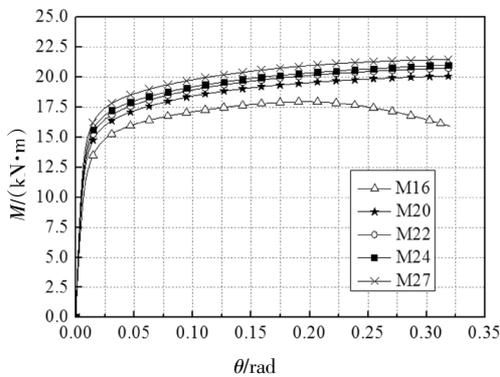
(b)负弯矩作用下

图 20 弧形垫片厚度的影响

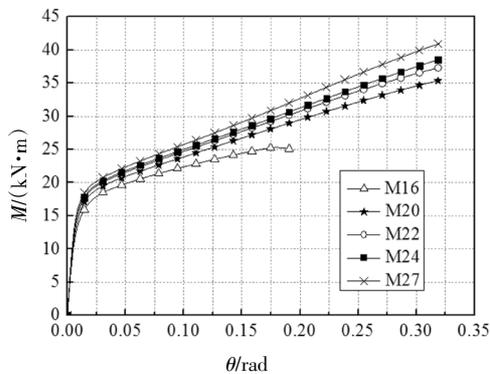
Fig.20 Influence of the convex washer thickness

5.7 螺栓尺寸的影响

由螺栓球柱节点的传力途径可知,螺栓是重要的传力构件.通过 29~33 号模型研究了螺栓尺寸对节点受弯性能的影响.由图 21 中各节点的弯矩-转角曲线可知,节点的受弯性能随螺栓尺寸的增加而上升,但其影响并不显著.需注意,29 号模型的弯矩-转角曲线出现负刚度,为避免节点刚度不足,不宜选用尺寸过小的螺栓.



(a)正弯矩作用下



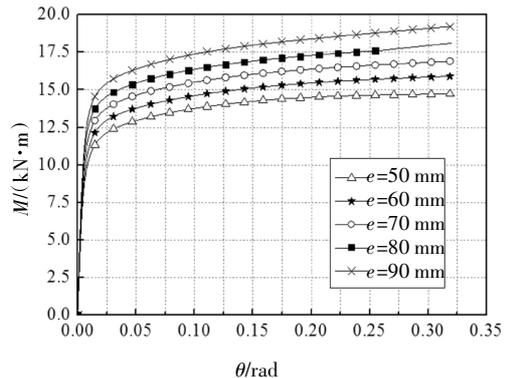
(b)负弯矩作用下

图 21 螺栓尺寸的影响

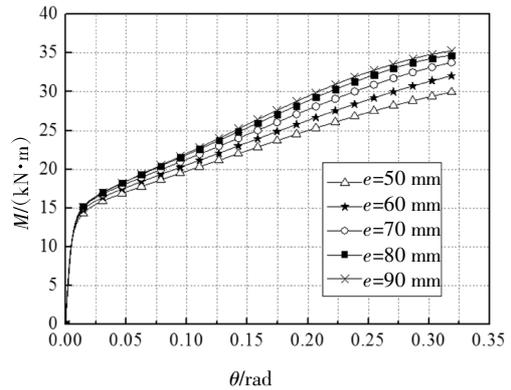
Fig.21 Influence of the bolt size

5.8 螺栓间距的影响

34~38 号模型的弯矩-转角曲线如图 22 所示.当其他参数不变时,随着螺栓间距的增大,力臂长度增大,节点的抗弯刚度及承载力上升,且正弯矩作用下螺栓间距的影响更为显著.但实际工程中,增加螺栓间距会造成筒壁高度增大,且通常会规定标准螺栓间距,因此可忽略螺栓间距的影响.



(a)正弯矩作用下



(b)负弯矩作用下

图 22 螺栓间距的影响

Fig.22 Influence of the bolt interval

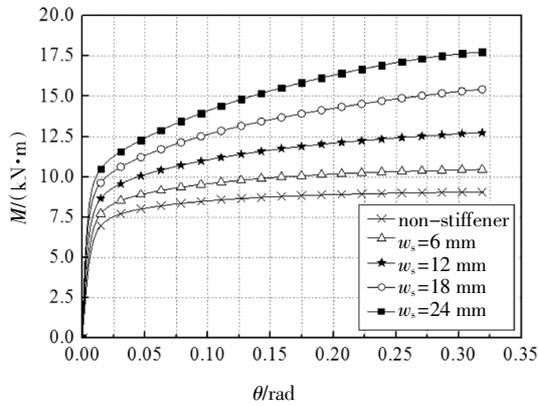
5.9 加劲肋宽度的影响

加劲肋宽度对节点抗弯刚度的影响通过 39~43 号模型进行研究.由图 23 可知,加劲肋宽度从 6 mm 增大至 24 mm 时,正、负弯矩作用下节点的初始抗弯刚度分别上升了 211.7%和 197.2%;抗弯承载力分别上升了 51.2%和 38.3%,且正弯矩作用下加劲肋宽度的影响更为明显.同时,加劲肋宽度大于 6 mm 时才能大幅提高节点的抗弯刚度.

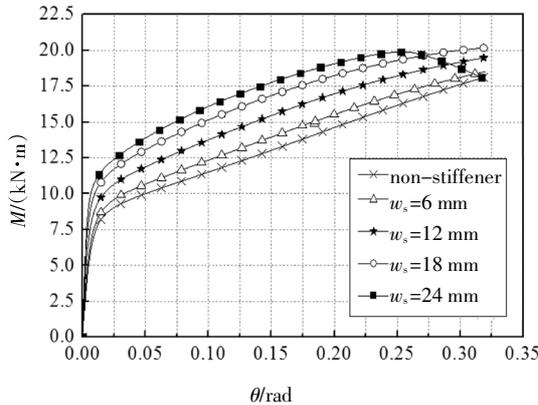
5.10 加劲肋厚度的影响

加劲肋厚度对节点抗弯刚度的影响通过 39、42、44~46 号模型进行研究.加劲肋厚度从 6 mm 增大至 12 mm 时,正、负弯矩作用下节点的初始抗弯刚度分

别上升了 19.0%和 18.6%; 抗弯承载力分别上升了 14.8%和 10.9%. 对比图 23 和图 24 可知, 增大加劲肋宽度对节点受弯性能的提高作用比增大加劲肋厚度的作用更明显.



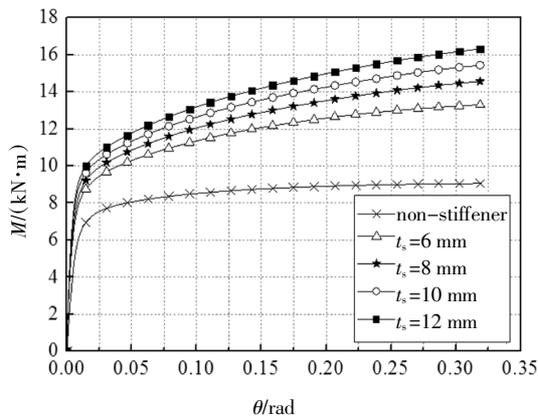
(a)正弯矩作用下



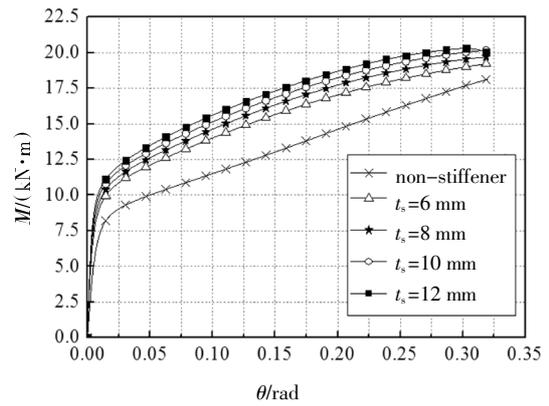
(b)负弯矩作用下

图 23 加劲肋宽度的影响

Fig.23 Influence of the ribbed stiffener width



(a)正弯矩作用下



(b)负弯矩作用下

图 24 加劲肋厚度的影响

Fig.24 Influence of the ribbed stiffener thickness

6 结论

本文建立了单向受弯螺栓球柱节点的数值模型,并与已有试验结果进行对比,验证了数值模型的有效性.为消除杆件轴力对节点受弯性能的影响,对数值模型进行了合理的简化,建立了 46 个螺栓球柱节点的数值模型,详细研究了螺栓球柱节点受弯性能的影响参数,可得出以下结论:

1)数值分析得到的单向受弯螺栓球柱节点的破坏模型、螺栓内力、荷载-位移曲线与试验结果吻合良好,数值模型可准确模拟节点的受弯性能.

2)分析了螺栓球柱节点在正、负弯矩作用下的受力性能,确定了节点的变形特性及螺栓内力的变化规律,并提出了节点抗弯承载力的取值准则.

3)通过参数分析发现,节点体的几何尺寸对其受弯性能有显著影响.圆柱筒壁直径越小、壁厚越厚,节点刚度越大;但节点刚度基本不受筒壁高度影响.此外,筒壁壁厚过大或过小都会导致节点延性下降,应对壁厚进行合理设计.

4)与节点相连的杆件宽度、弧形垫片厚度、螺栓尺寸及间距等因素均对节点的受弯性能有一定的影响,且节点受正弯矩时影响更为显著.

5)设置加劲肋可显著提高节点的抗弯刚度,增大加劲肋宽度对节点受弯性能的提高作用比增大加劲肋厚度更为明显.

参考文献

- [1] JGJ7—2010 空间网格结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:16—17.
JGJ7—2010 Technical specification for space frame structures [S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2010:16—17. (In Chinese)
- [2] 王星,董石麟,完海鹰.焊接球节点刚度对网架内力和挠度的影响分析[J].空间结构,1996,2(4):34—40.
WANG X,DONG S L,WAN H Y. Analysis of influence of welding spherical joint stiffness on internal force and deflection of grid [J]. Spatial Structures,1996,2(4):34—40. (In Chinese)
- [3] 完海鹰.网架结构焊接空心球节点轴力柔度和弯曲刚度的有限元分析[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),1998,6(4):33—36.
WAN H Y. Finite element analysis of axial flexibility and flexural stiffness of welded hollow spherical joints of space trusses structure [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture (Natural Science),1998,6(4):33—36. (In Chinese)
- [4] 王星,董石麟,完海鹰.焊接球节点刚度的有限元分析[J].浙江大学学报(工学版),2000,34(1):77—82.
WANG X,DONG S L,WAN H Y. Finite element analysis of welded spherical joints' stiffness [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2000,34(1):77—82. (In Chinese)
- [5] LOPEZ A,PUENTE I,SERNA M A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints [J]. Computers & Structures,2007,85(7):360—374.
- [6] LOPEZ A,PUENTE I,AIZPURUA H. Experimental and analytical studies on the rotational stiffness of joints for single-layer structures [J]. Engineering Structures,2011,33(3):731—737.
- [7] 张竞乐,赵金城.节点刚度对凯威特型单层球面网壳稳定性的影响[J].空间结构,2004,10(2):43—45.
ZHANG J L,ZHAO J C. The influence of joint stiffness exerted on the stability of Kiewitte-type single-layer reticulated shells [J]. Spatial Structures,2004,10(2):43—45. (In Chinese)
- [8] 康菊,宋振森.节点刚度对有缺陷短程线球面网壳稳定性的影响[J].四川建筑科学研究,2008,34(1):42—46.
KANG J,SONG Z S. The influence of joint stiffness on the stability of geodesic single-layer reticulated shells with initial imperfection [J]. Sichuan Building Science,2008,34(1):42—46. (In Chinese)
- [9] 彭礼,郭小农.网架结构:CN203200923U[P].2013-04-08.
PENG L,GUO X N. Non-purlin gird structure of bolted-ball-cylinder joints:CN203200923U[P].2013-04-08. (In Chinese)
- [10] 郭小农,黄泽鞞,杨商飞,等.新型螺栓球柱节点静力承载性能试验研究 [J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(11):1626—1633.
GUO X N,HUANG Z W,YANG S F,*et al.* Experimental study of static bearing behavior of bolted ball-cylinder joint [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2015,43(11):1626—1633. (In Chinese)
- [11] 郭小农,黄泽鞞,彭礼,等.螺栓球柱节点单向受压承载力研究 [J].建筑结构学报,2018,39(12):98—109.
GUO X N,HUANG Z W,PENG L,*et al.* Study of bearing capacity of bolted ball-cylinder joints under uniaxial compression [J]. Journal of Building Structures,2018,39(12):98—109. (In Chinese)
- [12] BS EN 1993-1-8:2005 CEN Eurocode 3: design of steel structures - Part 1-8: design of joints [S]. London: British Standards Institution,2005:54—56.