

新型抗剪性螺栓球节点力学性能研究

Study on Mechanical Properties of New Shear Resistant Bolts Ball Joints

谢洪阳¹, 陈逸川¹, 付 炜¹, 胡晓莲², 莫 新²

(1. 南昌航空大学 土木建筑学院, 南昌 330063; 2. 江西建工机械施工有限责任公司, 南昌 330096)

摘 要: 为了开发无主檩螺栓球节点网架结构, 设计了新型抗剪性螺栓球节点, 通过压、拉、剪试验, 对 M24、M27、M30 三种不同螺栓直径的新型螺栓球节点进行试验, 研究其各组成部件及整体力学性能。结果表明: 节点受压时, 新型节点套筒比普通节点的更抗压, 且新型节点螺栓承受了一定的力; 受拉时, 两种节点各部件力学变化规律一致; 受弯剪时, 新型节点抗剪性能有一定提升, M24、M27、M30 新型节点的极限弯矩分别提升了 2%、6%、13%。将试验结果和模拟结果进行对比, 最大误差不超过 10% 左右。

关键词: 新型螺栓球节点; 节点应变; 节点弯矩; 力学试验; 有限元模拟; 对比分析

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0110-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.019

XIE Hongyang¹, CHEN Yichuan¹, FU Wei¹, HU Xiaolian², MO Xin²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Jiangxi Construction Machinery Construction Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to develop the grid structure of the ownerless purlin bolt ball joint, a new shear bolt ball joint was designed, and the ball joints of three new bolts with different bolt diameters of M24, M27 and M30 were tested through the compression, tension and shear tests, and their components and overall mechanical properties were studied. The results show that when the joint is compressed, the new node sleeve is more compressive than the ordinary joint, and the new node bolt bears a certain force. When tensioned, the mechanical variation law of each component of the two joints is consistent. When subjected to bending shear, the shear resistance of the new joint is improved to a certain extent, the ultimate bending moments of the new M24, M27 and M30 joints are increased by 2%, 6% and 13% respectively. The test results are compared with the simulation results, and the maximum error is not more than about 10%.

Key words: new bolt ball nodes; nodal strain; nodal moments; mechanical tests; finite element analysis; comparative analysis

0 引言

螺栓球网架结构因结构稳固、施工便捷、外型美观而被广泛应用。为减轻屋面结构自重及考虑经济性, 网格往往较大, 而网架上弦的分格决定了主

檩条的间距。檩条间距过大, 即屋面板跨度过大, 导致屋面板设计不合理, 所以网架屋面通常采用主次檩条相结合的方式, 但这种方式较耗费时间。无主檩螺栓球网架结构大大简化了屋面体系, 它是将上弦杆同时作为屋面主檩。无主檩螺栓球节点网架结构对螺栓球节点的抗剪性能要求较高。

国内外学者对螺栓球节点进行了研究。李亚明等^[1]介绍了大跨空间结构的发展现状和一些典型的工程实例, 对空间结构的关键理论、结构体系、新

作者简介: 谢洪阳 (1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 结构设计优化、结构抗震机理等。

收稿日期: 2024-10-29

材料等进行梳理；王鹏月^[2]设计一种新型螺栓球-H型钢梁网架，采用螺栓半球、圆柱体、节点板、高强螺栓和H型钢梁代替了上弦杆；Yang^[3]采用常规空间结构的八角高强螺栓设计了一款新型螺栓球节点，这种新型节点在抗扭承载力上远远高于传统节点；Hong等^[4]使用有限元软件Ansys对空间网架结构进行各种荷载工况下的静力分析、屈曲分析和杆件截面优化设计，使设计的杆件截面更加合理，达到最大经济性；刘磊^[5]设计了四种规格的大直径螺栓及节点的各种配件，当大直径螺栓的拧入深度为 $1.1d$ 时，其抗拉强度、伸长率、收缩率均达到规定要求；罗豫婷^[6]利用有限元软件Ansys建立螺栓球节点单层球面网壳精细化数值模型，对K8型单层球面网壳采用时程分析法分别进行多遇地震、罕遇地震作用下的弹塑性动力响应计算；张辉东等^[7]发明了一种新型装配式空心螺栓球节点，空心状螺栓球是由两个半球状体组合一起，通过螺栓加盖板实现固定连接，锥头用螺栓可以直接与螺栓球连接，中间省去了套筒，这种新型螺栓球节点拼装过程不需要进行焊接，工作效率大大提高，而且空心螺栓球体，减少了节点自重；杨伟等^[8]对螺栓球节点进行了单向拉伸试验，提出了在节点受拉时，应注意验算套筒的强度与接触面的抗压强度和验算锥头顶部的承载力，保证球体承载力高于其他构件承载力的建议；田少杰^[9]进行M27高强螺栓的疲劳试验，给出了对于实际工程中的吊点螺栓，由于小车在刹车过程中会产生横向水平制动力，不仅受到轴向拉力，也受到一定的弯矩作用；赵宇^[10]对刚架结构、网壳结构、拱形结构、悬索结构、网架结构、薄壳结构、桁架结构七种大跨度建筑结构形式的特点进行了逐一分析，结果显示网架结构具有刚度大、重量小、受力性能好、抗震等优势；曾佳等^[11]将国内《钢结构设计规范》中关于高强螺栓受剪连接的构造要求，预紧力以及设计方法与其他国家的进行对比；杨晓东^[12]设计了一套用于研究网架结构节点疲劳性能的自平衡试验加载装置，工作时对试验装置的其他部分影响很小。

为了研究一种新型抗剪性螺栓球节点，采用试验和模拟相结合的方法对M24、M27、M30螺栓的新

型节点进行受力性能分析，探究节点受压、受拉情况下各部件的力学变化规律，受弯剪情况下的整体力学变化规律。

1 新型抗剪性螺栓球节点设计

新型抗剪性螺栓球节点（以下简称“新型节点”）各组成部件如图1所示。高强度螺栓按照GB/T 16939—2016《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》设计，套筒、锥头按照T/CECS 10300—2023《钢网架结构螺栓球节点用封板、锥头和套筒》设计。新型节点特点在于高强度螺栓杆与锥头均预留螺纹通孔，用螺钉和螺母将其连接牢固。

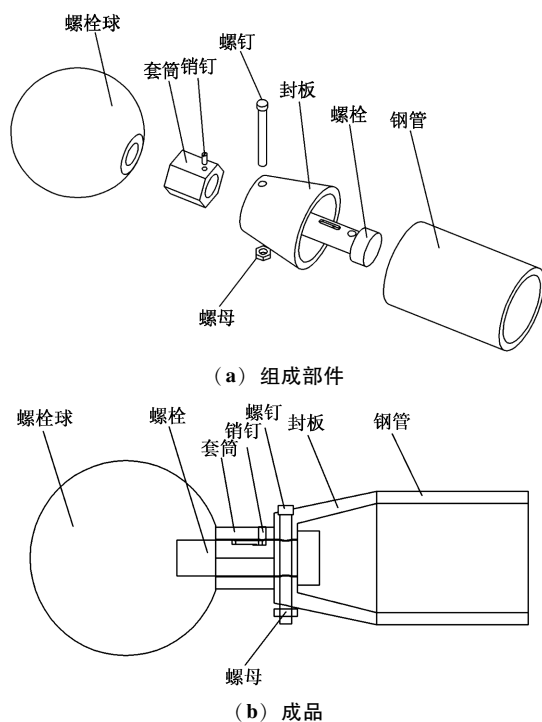


图1 新型螺栓球节点

Fig. 1 New bolt ball joints

2 螺栓球节点力学试验

2.1 试件构造及设定

试件如图2所示。在螺栓球节点套筒处预留粘贴应变片沟槽，设置4个支撑螺栓球的劲板和1个与试验装置连接的底板，底板上预留4个分别对应试验装置上的通孔，用于将底板与试验装置固定。

制备M24、M27、M30三个不同直径的普通与新型节点，每个直径分别进行压、拉、剪试验，节点

建筑结构



图2 螺栓球节点试件
Fig. 2 New bolt ball joints

参数见表1。试验编号规则为：JP 为普通节点，JX 为新型节点，Y、L、J 分别为试件受压、受拉、受剪试验。

表1 节点参数
Table 1 Node parameters

编号	螺栓球 /mm	螺栓 /mm	套筒长 /mm	锥头厚 /mm	钢管规格 /mm	加载方式
1	130	24	40	16	φ88.5×4	Y, L, J
2	130	27	40	20	φ88.5×4	Y, L, J
3	130	30	45	20	φ88.5×4	Y, L, J

2.2 测点布置及加载方式

做压或拉试验时，为了探究螺栓球节点各部件应变随荷载的变化关系，采用 DH3818Y 静态应变测试仪和型号为 BE120-3AA-P100 的应变片，每个螺栓球节点布置 5 个测点，测点 1 位于钢杆 50 mm 处、测点 2 处于锥头中心部位、测点 3 位于高强度螺栓杆距离螺帽 20 mm、测点 4 和测点 5 位于距离套筒底 10 mm，每个测点上粘贴应变片。测点详细分布及施力方式如图 3 所示。

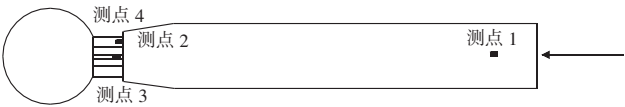


图3 螺栓球节点压、拉测点及施力方式
Fig. 3 Bolt ball node pressure, tension measurement point and force application method

做抗剪试验时，从钢杆处选取了 2 个测点用于测量节点受剪时所发生的位移，测点如图 4 所示。节点整体可以视为一根杆件，以钢杆的真实转角反映节点转角，2 个位移计所测量的位移分别为 Δ_1 、 Δ_2 ，

根据两者位移量通过公式得出转角：

$$\theta = |\Delta_1 - \Delta_2| / L_{12}$$
 (1)

节点一端固定一端自由，在受到荷载 F 的作用下，螺栓球和套筒部位处将产生弯矩，弯矩可由压力机传感器显示的荷载数据 F 和施加荷载点距离底部半球的距离 L 所计算出来：

$$M = FL \cos \theta$$
 (2)

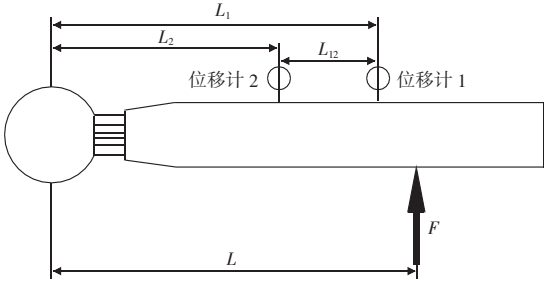


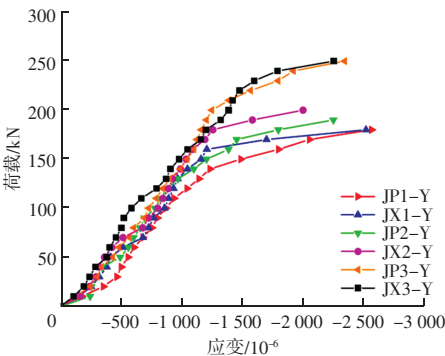
图4 螺栓球节点弯剪测点及施力方式
Fig. 4 Bolt ball joint shear point and force application method

在抗压试验时，试件上方球形承力转接头，可以把上方压力机的力均匀稳定地传递给下方钢管。在抗拉试验时，因为压力机不好给试件向上的拉力，所以拉力试验需通过钢绳传力给试件施加向上的拉力。

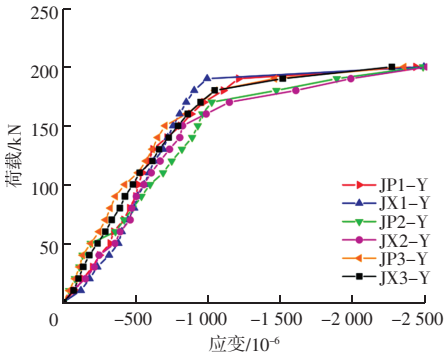
2.3 试验结果

图 5 为试件受压时各部件位置测点的荷载 - 应变曲线图。在施加荷载初期，由于各部件材料都处于弹性阶段，呈直线上升趋势。当荷载加到一定时，套筒处依次发生屈服，螺栓直径最小的节点曲线最先有转折；螺栓直径越大，套筒的极限荷载越大，抗压性能越好；新型节点相对于普通节点有一定的提升，同一荷载下的应变变小。就锥头和钢管而言，由于材料性能一致且力学作用直接施加在自身上面，总体曲线趋势大致相似且屈服后归于同一根平稳曲线。普通节点不受压力影响，新型节点由于增加了螺钉和螺母组合，所以试件受压时锥头会带动螺钉挤压螺栓杆内部，新型节点荷载 - 应变曲线图总体呈直线上升趋势，未达到屈服状态，且随着螺栓直径增加，螺栓抗压性能越好。

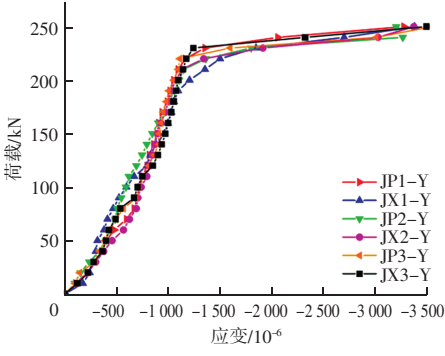
图 6 为试件受拉时各部件的荷载 - 应变曲线图。锥头和钢管的曲线图和受压时一致，和自身材料属性有关。螺栓受拉时，相应同规格新型与普通节点的曲线趋势相似，且呈直线上升状态，螺栓直径越大，抗拉性能越好。



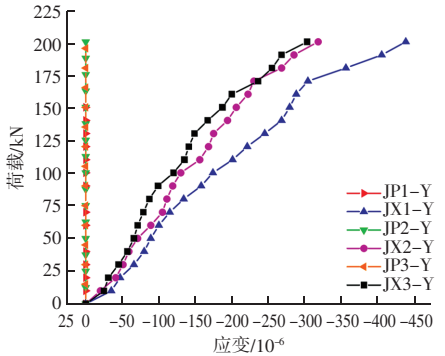
(a) 套筒荷载 - 应变曲线图



(b) 锥头荷载 - 应变曲线图



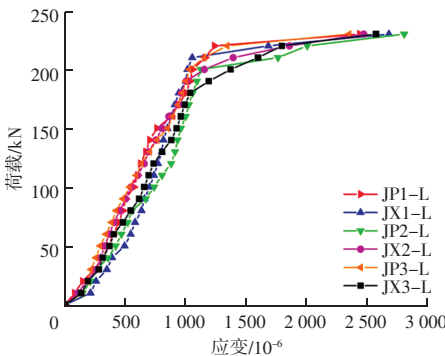
(c) 钢管荷载 - 应变曲线图



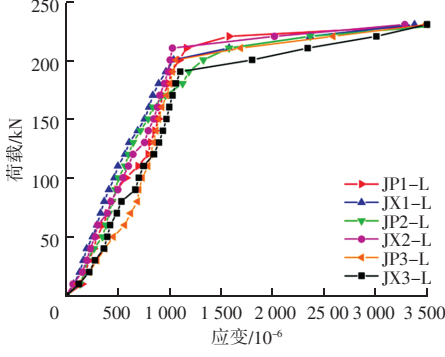
(d) 螺栓荷载 - 应变曲线图

图5 螺栓球节点试验受压曲线图

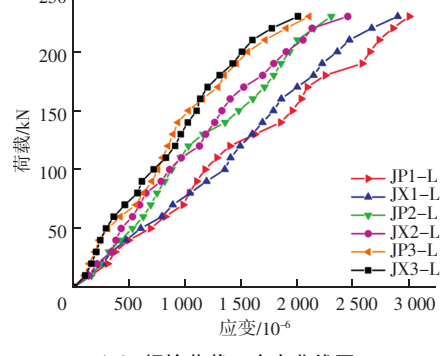
Fig. 5 Curve diagram of each component under compression in bolt ball joint test



(a) 锥头荷载 - 应变曲线图



(b) 钢管荷载 - 应变曲线图



(c) 螺栓荷载 - 应变曲线图

图6 螺栓球节点试验受拉曲线图

Fig. 6 Curve diagram of each component under tension in bolt ball joint test

图7为试件受剪时的弯矩 - 转角曲线图。螺栓直径越大,节点抗剪性能越好。在初期阶段,新型与普通节点初始刚度相差并不大;但在后期,新型节点极限弯矩大于普通节点,新型节点抗剪能力比普通节点较好。

3 有限元模拟分析

为了进一步探究新型节点的力学性能,用有限元软件对普通和新型节点进行模拟分析,结合试验数据开展对比分析。

建筑结构

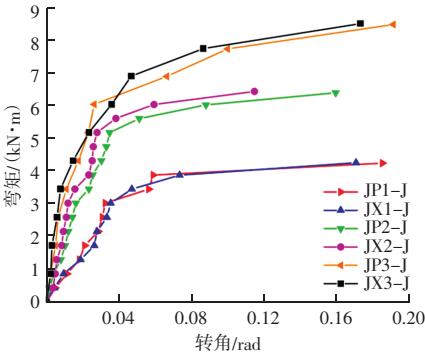


图7 螺栓球节点试验受剪弯矩 - 转角曲线图
Fig.7 Shear bending moment - rotation curve of bolt joint test

3.1 有限元模型建立

运用 PROE 建模软件建立各部件模型并导出 step 文件类型,再导入到 Abaqus 软件,建立三种不同高强度螺栓直径 M24、M27、M30 的普通和新型节点模型。各部件在 Abaqus 导入完成后,在 Assembly 模块将各部件装配成螺栓球节点结构,结果如图 8 所示。

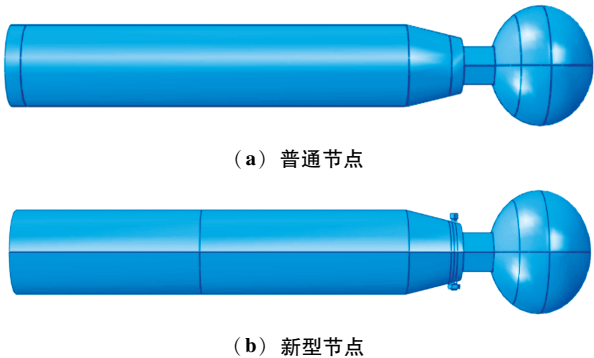


图8 有限元模型
Fig.8 Finite element model

3.2 材料参数设定

M24、M27、M30 螺栓一律采用 10.9 级,材料为 40Cr,螺栓球选用 45 钢,套筒和锥头的材料为 Q235,螺钉螺母材料为 40Cr。各部件材料参数见表 2。

表 2 节点材料参数

Table 2 Nodal material parameters

构件名称	材料	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性模量 /MPa	泊松比
螺栓球	45 钢	365	601	210 000	0.3
螺栓	40Cr	940	1 000	210 000	0.3
套筒、锥头	Q235	235	402	210 000	0.3

3.3 模拟结果分析

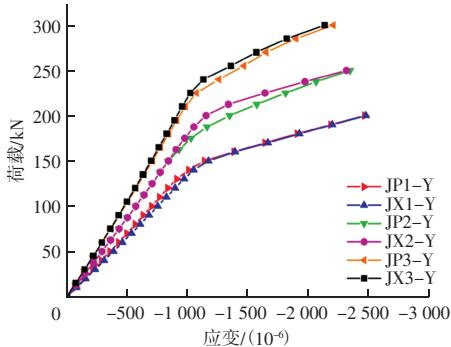
图 9 为螺栓球节点受压时各个部件的荷载 - 应变图。M24 的新型与普通节点套筒应变变化相差不大,M27、M30 的新型与普通节点套筒应变变化前期大致一

样,但普通节点的比新型节点的先达到屈服状态,且中后期同一荷载下的新型节点套筒应变变量小于普通节点。

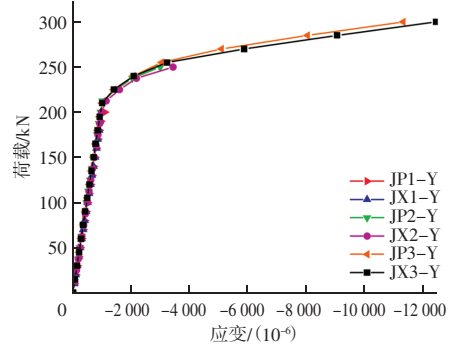
锥头和钢管处各个荷载 - 应变曲线几乎一致,因为压力作用是直接施加在两者身上,应变的变化与自身的材料属性有关。

普通节点在受到压力作用时,螺栓几乎不受影响,所以普通节点的螺栓应变变量非常小,图 9 (c) 显示为竖直向上的直线。新型节点由于在螺栓杆与锥头中间插入了螺钉,锥头受压会带动螺钉挤压螺栓杆,使螺栓产生应变变量,新型节点应变变量较小,且随着螺栓直径的增加,抗应变效果更好。

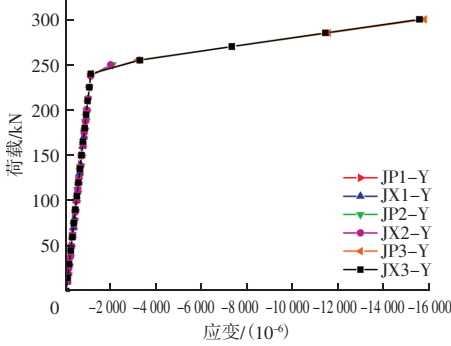
总体而言,螺栓球节点受压时,新型节点套筒的性能较普通节点套筒略微提升,新加的螺钉分担



(a) 套筒



(b) 锥头



(c) 钢管

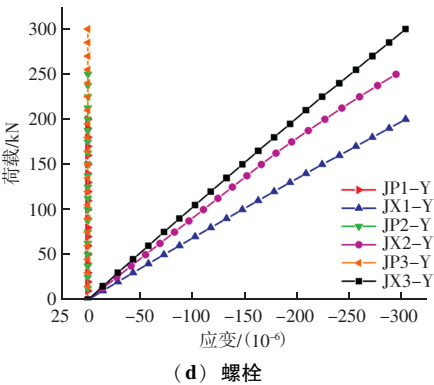


图 9 螺栓球节点模拟受压曲线图

Fig. 9 The bolt ball node simulates the curve of each component under compression

了一定的压力作用，新型节点中螺栓承受了压力，但影响不大。

图 10 为螺栓球节点受拉时各部件的荷载 - 应变图。与受压试验一样，所有规格节点的锥头与钢管处应变趋势几乎一致。普通和新型节点的螺栓应变大致相似，但随着螺栓直径增加，螺栓抗应变能力更好。图 11 为螺栓球节点受剪时的弯矩 - 转角图。新型节点的初始刚度、极限弯矩比普通节点都有一定的提升，虽然 M24 新型与普通节点的曲线图几乎一致，但抗剪能力也有着微小提升，对于 M27、M30

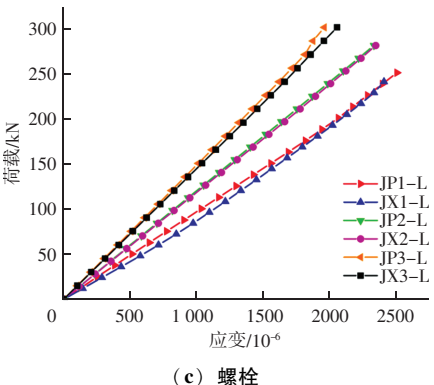


图 10 螺栓球节点模拟受拉曲线图

Fig. 10 The bolt ball joint simulates the curve diagram of each component under tension

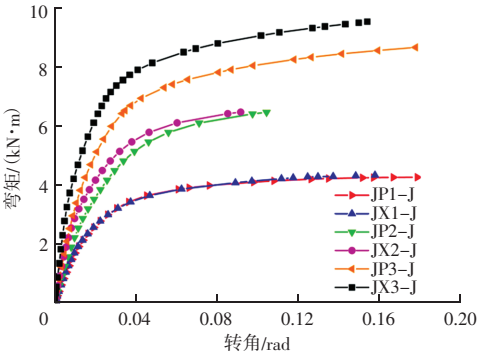


图 11 螺栓球节点模拟受剪弯矩 - 转角曲线图

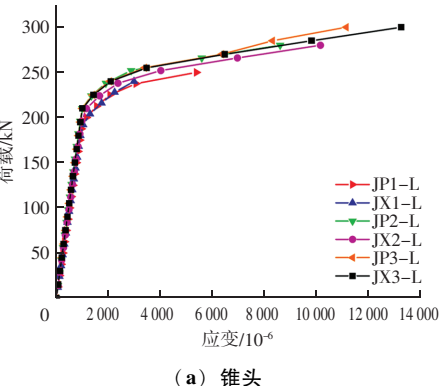
Fig. 11 The bolt ball joint simulates the shear bending moment - rotation curve

新型节点抗剪能力有了一定的提升，相比普通节点而言，M24、M27、M30 新型节点的极限弯矩分别提升了 2%、6%、13%。总体而言，随着螺栓直径的增加，新型节点的抗剪性会提高。

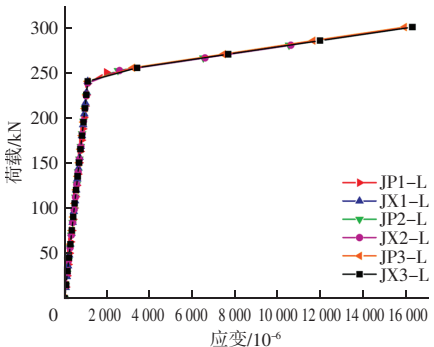
4 试验结果与分析

为了进一步验证新型节点的力学性能变化规律，将试验结果和有限元模拟结果结合起来，对比分析节点的应变、弯矩变化情况，如图 12 所示。选取 JX1 - Y 节点套筒受压时的荷载 - 应变曲线图进行对比分析。前期同一荷载情况下，试验的应变比模拟大，但随着荷载的增加，它们的曲线逐渐接近，变化规律基本一致。选取 JX2 - L 节点螺栓受拉时的荷载 - 应变曲线图进行对比分析。前期情况下，试验和模拟的曲线大致相似；后期因为加载作用的面为钢材，相互作用情况下容易发生变形，所以试验中螺栓应变会大一些。

选取所有新型节点受剪时的弯矩 - 转角曲线图



(a) 锥头



(b) 钢管

建筑结构

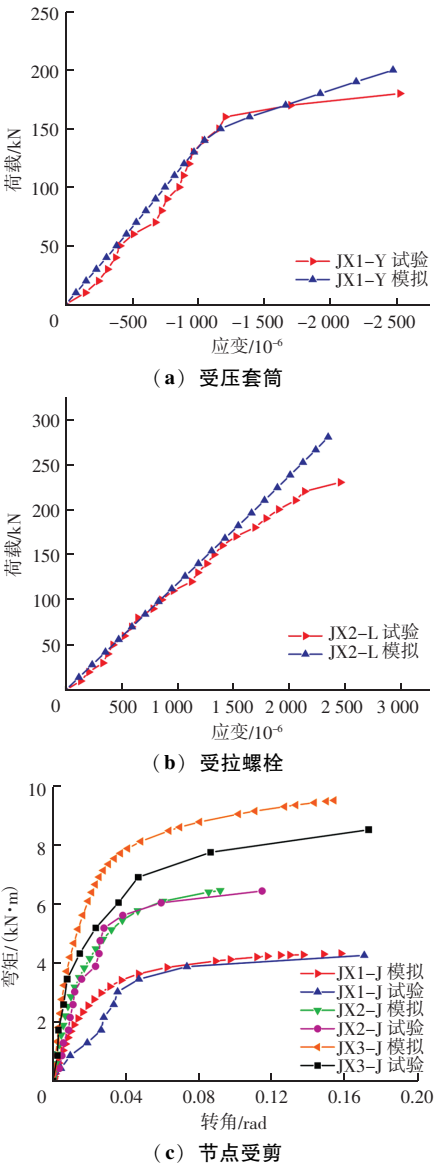


图 12 新型节点试验与模拟对比图

Fig. 12 Comparison diagram of test and simulation of new joints

进行对比分析。由于试件难免会存在加工误差，各部件组装完成导致自身不平直，所以在试验过程中产生了误差，试验节点的刚度和极限弯矩均小于模拟，但试验与模拟最大误差约在 10% 左右。

5 结论

通过试验对新型抗剪性螺栓球节点力学性能进行分析，得出以下主要结论：

(1) 从螺栓球节点试验情况来看，受压力时，

新型节点较普通节点抗压能力有一定的提升，因为内部螺钉分担了一定的力，螺钉挤压螺栓使其也受力；受拉力时，两者情况基本一致；受剪力时，螺栓直径越大，节点的抗剪性能越好，新型节点抗剪性能得到了提升。

(2) 从螺栓球节点模拟情况来看，验证了试验时节点一些力学变化规律的合理性。

(3) 将螺栓球节点试验和模拟结果相结合，由于试验自身存在的误差，试验的极限数值较模拟偏小，但曲线的变化趋势大致相似，试验与模拟之间的误差在一定范围内可忽略不计。

参 考 文 献

[1] 李亚明, 贾水钟. 大跨空间结构技术创新与实践 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (17): 98-105, 140.

[2] 王鹏月. 新型螺栓球-H 型钢梁网架的力学性能研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.

[3] YANG D B. Experimental and numerical studies on a new type of bolt-ball joint for spatial grid structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 188: 107035.

[4] HONG J C, YUE H W. Application of Ansys in grid structure [C] //Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2013, 271: 705-709.

[5] 刘磊. 空间网格结构大直径螺栓球节点设计研发及力学性能研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.

[6] 罗豫婷. 螺栓球节点的滞回性能研究及其网壳弹塑性地震反应分析 [D]. 广州: 广州大学, 2023.

[7] 张辉东, 宁涛, 刘绪佳, 等. 一种新型装配式空心螺栓球节点 [P]. 中国专利 202022453758. 4, 2021-07-13.

[8] 杨伟, 贺贤娟. 螺栓球网架节点的试验研究 [C]. 第六届空间结构学术会议论文集, 1992.

[9] 田少杰. 在役螺栓球网架结构 M27 高强螺栓的疲劳分析与试验验证 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.

[10] 赵宇. 论大跨度建筑结构形式与设计 [J]. 山西建筑, 2014, 40 (20): 61-62.

[11] 曾佳, 聂诗东, 杨波, 等. 高强螺栓抗剪连接的设计方法比较 [C] //第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2017: 7.

[12] 杨晓东. 网架结构节点疲劳试验设计及数据分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.