

不同连接方式的不锈钢梁柱节点的抗震性能有限元分析

王元清¹, 乔学良², 贾连光², 张天雄³, 蒋庆林⁴

(1. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

4. 江苏东阁不锈钢制品有限公司, 江苏 盐城 224212)

摘要 目的 研究国内 S316L 不锈钢材料梁柱栓焊连接节点的承载性能及变形能力, 比较不同种类螺栓(不锈钢螺栓 A4-80、A4-70 及达克罗 8.8 级)所对应的节点力学性能的差异。方法 考虑不锈钢材料抗滑移系数较小, 所以将摩擦型连接改进为承压型连接开孔受力, 并分别对 8 mm、12 mm、14 mm、16 mm 的不同厚度不锈钢板材进行材性试验; 通过数据处理得出材料精确的本构关系, 根据 S316L 不锈钢材及 3 种螺栓材料本构关系, 采用高效精确的有限元模型对不锈钢材梁柱节点在梁端施加循环往复荷载, 进行循环加载下的受力性能模拟分析。结果 延性系数最好的是达克罗 8.8 级所对应的节点, 延性系数为 4.2, 另外两种螺栓对应的节点延性系数基本相同, 都达到 4.1, 模拟结果与试验较符合。结论 3 种螺栓对应的节点承载性能和抗震性能相差不大, 综合考虑金属间腐蚀和价格等因素, 建议选用 A4-70 螺栓应用于不锈钢梁柱栓焊节点中。

关键词 不锈钢材料; 梁柱节点; 有限元模拟; 承载性能; 变形能力

中图分类号 TU391

文献标志码 A

FEM Analysis on Seismic Behavior of Stainless-Steel Beam-Column Connections with Different Link Method

WANG Yuanqing¹, QIAO Xueliang², JIA Lianguang², ZHANG Tianxiong³, JIANG Qinglin⁴

(1. Department of Civil Engineering, Key Lab. of Civil Eng. Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, China, 100084; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, 300072; 4. Jiangsu Dongge Stainless Steel Manufactures Co. Ltd, Yancheng, China, 224212)

收稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108007); 清华大学自主科研计划课题(学科交叉专项)项目(20131089288)

作者简介: 王元清(1963—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事钢结构疲劳、断裂和稳定等方面研究。

Abstract: The domestic and overseas research of stainless-steel are mainly focused on material and component at present, and the research of beam-column connections are less. In order to study the resistance and rotation capacity of beam-column connections using stainless-steel S31608, and in the difference kinds of bolt (stainless-steel bolt A4-80、A4-70 and zinc-plated bolt 8.8), flange-welded connections, efficient and accuracy FEM is proposed for numerical simulation under cycling loading based on the material stress-strain relationship of stainless-steel structure. The slipping coefficient of stainless-steel is smaller, so this paper use bearing connection instead of friction type connection to improve connection form. In addition the accuracy constitutive relation about 8 mm、12 mm、14 mm、16 mm stainless-steel is obtained by material characteristic test. The result show that ductility coefficient of zinc-plated bolt 8.8 joint is best, and the ductility coefficient is 4.2. Others are almost same and the ductility coefficient is 4.1. But the ductility coefficient of three types joint differ little. Comparison between FEA results and experimental data shows that nonlinear FEA method is satisfactory in simulating the behavior of bolt connections under low-cycle loading. So A4-70 bolt can be required to applied to stainless-steel beam-column connections by considering corrosion and price.

Key words: stainless-steel; beam-column connection; finite element method (FEM); resistance; rotation capacity

随着建筑物的构造和用途的多样化发展,许多大型公共建筑基于使用功能要求,要求结构具有一定耐腐蚀能力和均匀的受力性能.而不锈钢结构凭借它自身的优越性能受到了建筑结构行业越来越多的关注^[1-3].在建筑结构中梁柱节点作为建筑钢结构重要组成部分,在结构整体承载力以及抗震性能方面都影响较大.但是我国在不锈钢方面的研究主要集中于构件和材料,对节点还未进行相关研究,为了推广不锈钢的应用,对节点研究必不可少,特别是在普通碳素钢结构中得到广泛应用的梁柱栓焊节点.

在我国“强柱弱梁”^[4-8]、“强节点弱构件”的基本抗震准则要求,塑性铰要产生在梁翼缘上距柱子一定距离的部位来耗散地震时产生的能量.但是很多国内外的大地震中普通碳素钢结构都在梁柱连接处的一级焊缝处发生脆性破坏^[9-10],抗震性能不是很理想.基于此,笔者通过应用高延性的不锈钢材料来探究节点的抗震性能,但由于未经过处理的不锈钢材料抗滑移系数太小^[11],节点采用不锈钢钢材给其研究带来了新的问题.当结构采用不锈钢材时,节点的延性会相应提

高,但同时不锈钢的材料自身抗滑移性能较普通钢差,可能会引起节点承载能力的降低.为了满足“强节点弱构件”^[12-14]的抗震原则,需通过有限元软件进行分析来确定不锈钢材节点承载力、节点刚度的大小及其延性和变形能力,并通过变换不同种类的螺栓分析其对节点的承载性能和延性特征的影响.研究表明:3种螺栓对应的节点承载性能和抗震性能相差不大,综合考虑金属间腐蚀和价格等因素,建议选用A4-70螺栓应用于不锈钢梁柱栓焊节点中.

1 有限元模型

1.1 节点设计

通过实际模拟对比及文献查阅了解到ABAQUS在针对非线性问题上比ANSYS的效率更高,所以笔者采用通用的ABAQUS有限元软件来对建立的模型进行计算.节点模型按照在清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室进行的试验建立.节点选用C3D8R实体单元对模型进行网格划分.节点尺寸如图1所示,括号内为第二组试件尺寸.第一组节点梁长2 m,柱高2.3 m,第二组节点

梁长 1.35 m,柱高 2.3 m. 梁 I 形截面尺寸 400 (300) mm × 150(200) mm × 12 mm × 8 mm, 柱 I 形截面尺寸 450 mm × 250 mm × 16 mm × 12 mm, 梁柱刚度比 $I_b/I_c = 0.42$. 经验算, 梁柱

板件宽厚比均满足《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)要求.

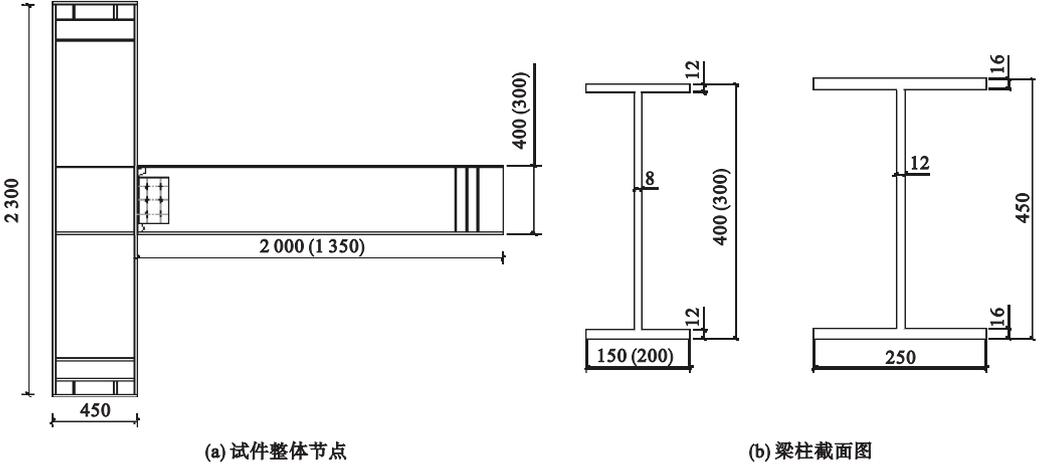


图 1 梁柱节点图

Fig. 1 The joint structure figure

对栓焊节点进行设计时,通常采用近似设计法,即梁翼缘受弯,腹板与螺栓受剪. 对 S31608 于不锈钢材,屈服强度选取^[15] $f_y = 205$ MPa,设计强度和抗剪强度分别取为 $f =$

185 MPa, $f_v = 107$ MPa,按梁考虑塑性的抗弯设计估算承载力 $F = 120$ kN. 3 种螺栓力学指标及配置情况见表 1. 螺栓孔的直径按照承压型连接最小要求尺寸开孔(见图 2).

表 1 螺栓参数

Table 1 Bolt parameters

螺栓种类	直径/mm	初拧弯矩/(N·m)	终拧弯矩/(N·m)	预紧力 P_c /kN	配置数目
不锈钢 A4 - 80	24	360	720	175	SP - 1(6)、SP - 4、SP - 5(4)
不锈钢 A4 - 7	24	320	640	155	SP - 2(6)
8.8 级达克罗	24	360	720	175	SP - 3(6)

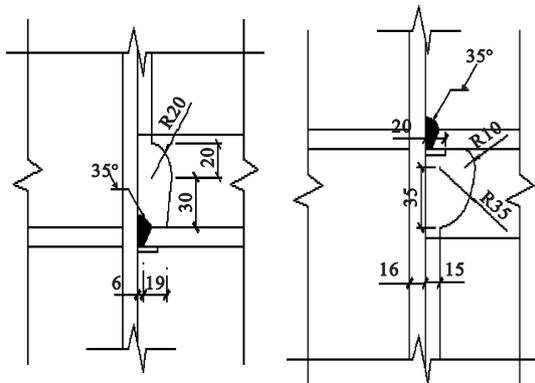


图 2 梁柱节点焊接孔细节图

Fig. 2 The weld access hole of beam-column connection

1.2 材料单调拉伸本构参数

梁柱节点模型所用 S316L 不锈钢材的单调拉伸应力 - 应变关系是在试验室进行单调拉伸实验所得结果,实测得到的强度及弹性模量等力学参数如表 2 所示.

ABAQUS 有限元程序中不能直接输入试验中测得的应力应变关系,需要通过下式将测得的名义应力应变转换为真实应力应变^[16],得到有限元计算用 S316L 不锈钢材的本构关系,转换后的真实应力应变如图 3 所示.

表 2 S31608 不锈钢材单调拉伸本构模型参数

Table 2 The constitutive model of parameters stainless-steel

不同厚度 S31606 材料/mm	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	极限应变 $\varepsilon_u/\%$
8	203 300	0.3	221	514	22.41
12	190 407	0.3	228	486	23.96
16	193 965	0.3	212	493	20.75

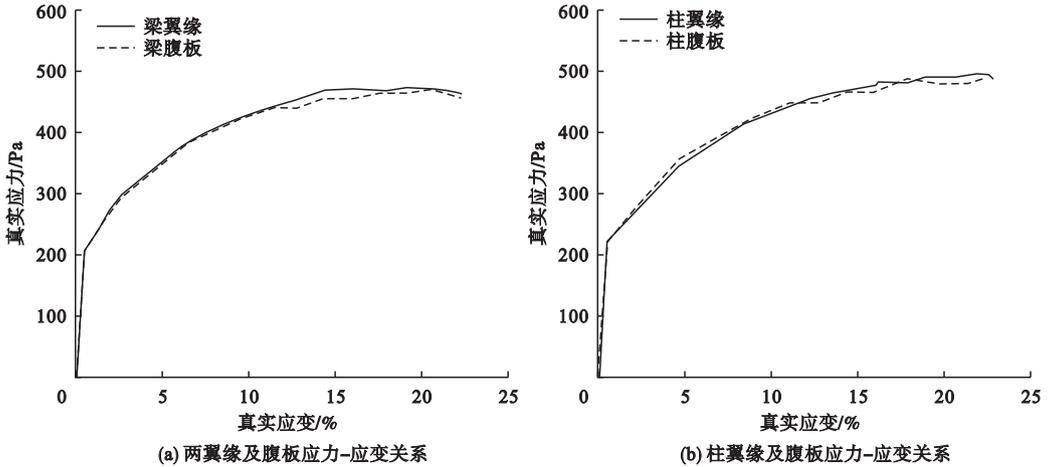


图 3 梁、柱翼缘及腹板应力 - 应变关系

Fig. 3 The stress-strain of beam-column connection material

有限元计算中各材料均采用 Von Mises 屈服准则及相关流动法则,循环加载采用混合强化准则.另外,节点模型中还需要在剪切板与梁腹板、剪切板和梁腹板与螺杆以及螺母与梁腹板和剪切板 4 个部分的接触关系,

除了试件 SP - 3 在螺栓的中面使用 Bolt Load 施加螺栓预紧力 155 kN,其他试件均施加 175 kN.有限元中建立的节点整体模型如图 4 所示.

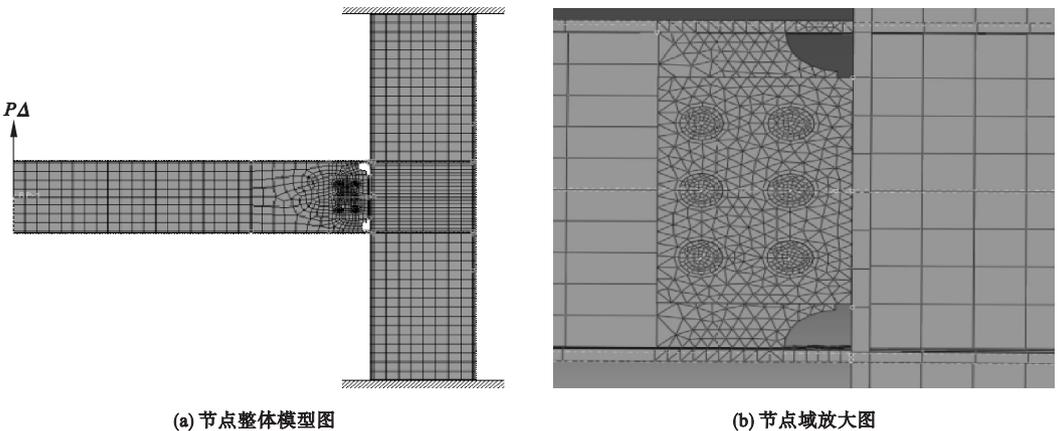


图 4 节点有限元模型

Fig. 4 The finite element model

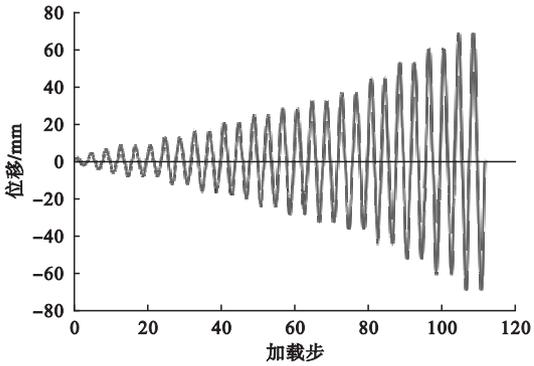
1.3 加载制度

笔者分别对 5 个试件在梁自由端施加循环荷载,柱子两端采用固结.循环加载方式依

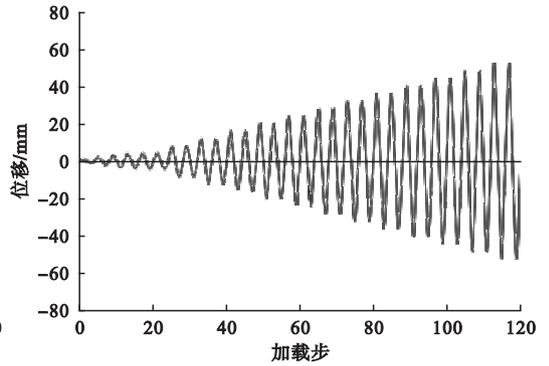
据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T101—2015)^[17]要求,采用荷载 - 位移双控制方法,但是为了有限元模拟方便,全程都采用位移

控制进行加载. 屈服前四级加载 $\Delta_y/4$ 、 $\Delta_y/2$ 、 $3\Delta_y/4$ 和 Δ_y , 每级循环 1 次; 在屈服后按照 Δ_y

的倍数增加, $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ 、 $4\Delta_y$, ..., 每级循环 2 次, 加载制度见图 5.



(a) SP-1~SP-3时间加载制度



(b) SP-4~SP-5时间加载制度

图 5 位移历程

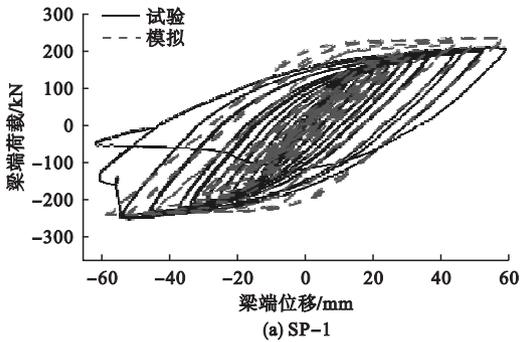
Fig. 5 The course of displacement

2 循环加载分析

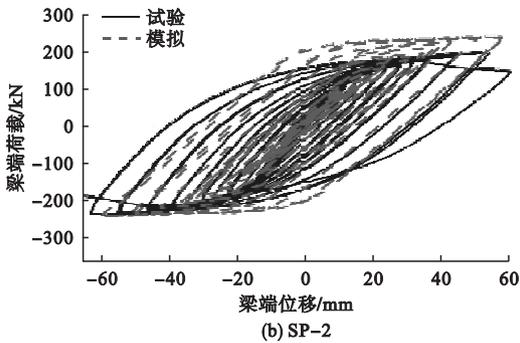
2.1 滞回特性

参照上述加载制度以及单调拉伸本构参数, 使用位移控制对栓焊混接节点进行循环加载, 5 个试件的梁端荷载 - 梁端位移曲线如图 6 所示.

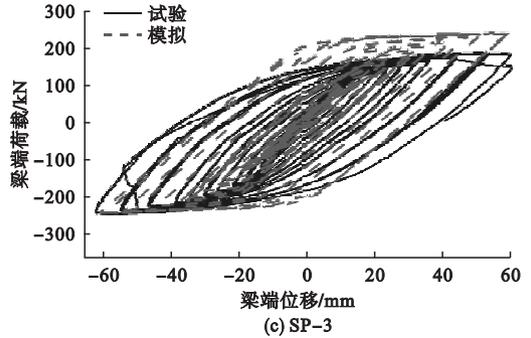
由计算结果可知: ① 5 个节点的滞回曲线形状对称, 在屈服位移之前, 加载刚度和卸载刚度基本一致, 所以滞回曲线基本重合为



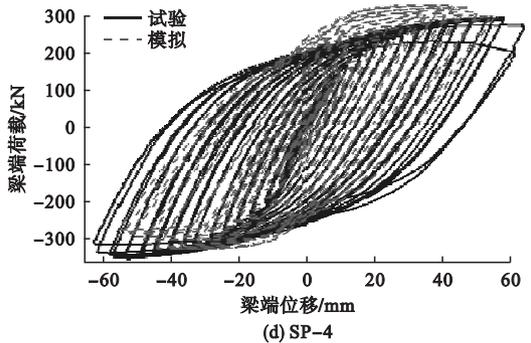
(a) SP-1



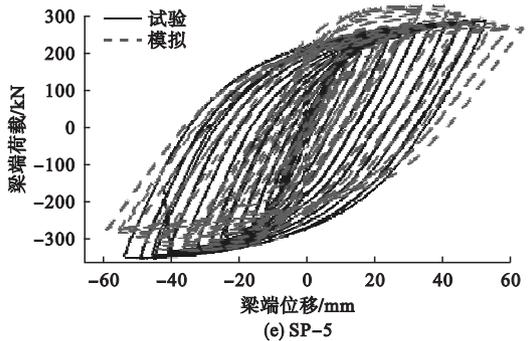
(b) SP-2



(c) SP-3



(d) SP-4



(e) SP-5

图 6 滞回曲线

Fig. 6 The hysteretic curve

一条直线,没有残余塑性变形. ②当节点进入塑性循环后,可以看出,SP-1~SP-3在整个加载过程中滞回曲线基本重合,SP-5~SP-6在40mm前的2次循环滞回曲线基本重合,之后的曲线重合程度开始下降,梁端所能承受的力也随曲线圈数的增加而降低,节点的卸载刚度也是逐渐降低. ③节点循环加载下存在强度和刚度的退化,而退化的程度与之前的循环次数、滞回环的面积、塑性变形均有密切关系^[18]. ④螺栓种类对滞回性能的影响较小,但是对剪切板进行三面围焊后,滞回性能得到了明显的提升. 这说明三面围焊后,降低了剪切板与腹板的滑移,螺栓的主要作用由受剪变成了安装时起定位作用.

滞回耗能及能量耗散系数^[17]计算结果如表3所示.

表3 节点滞回耗能

Table 3 The hysteretic curve energy dissipation

节点形式	总循环圈数	总耗能/J	耗能系数
SP-1	17	25 518	1.78
SP-2	17	25 932	1.81
SP-3	17	25 323	1.77
SP-4	23	35 834	2.02
SP-5	21	31 298	1.86

由耗能计算结果可以看出,第一组试件中,耗能性能最好的是达克罗8.8级对应的节点,耗能系数为1.81,不锈钢A4-80和A4-70所对应的节点,耗能系数基本相同,分别为1.78和1.77. 但是不同种类螺栓的对节点耗能影响较小,耗能系数相当接近. 第二组试件中,对剪切板进行三面围焊后的节点,相较于普通栓焊混接节点耗能会增大14.5%.

2.2 承载力及变形特性

根据节点的梁端力-位移滞回曲线可得到其骨架曲线如图7所示.

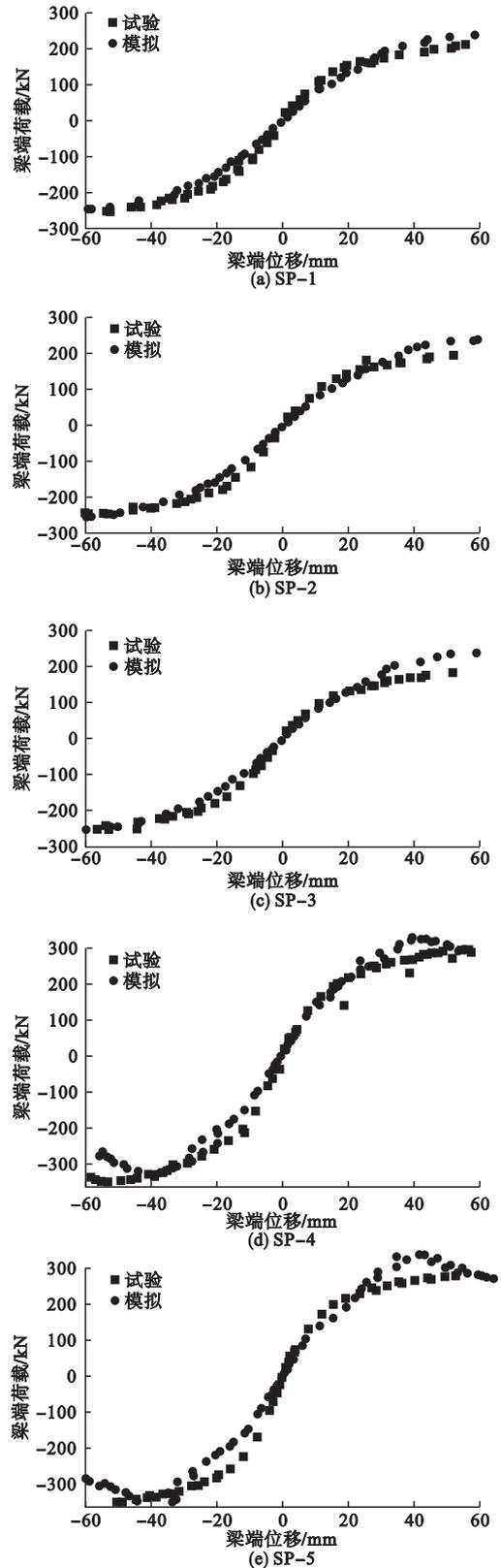


图7 骨架曲线

Fig. 7 The skeleton curve

试件的承载力、延性系数 μ 的计算^[17]及其他性能指标如表4所示. 梁端极限位移 δ_u

是承载力下降到最大承载力的85%所对应的梁端位移, $\mu = \delta_u / \delta_y$.

表4 节点承载力及变形能力

Table 4 The bearing capacity and deformability

节点形式	屈服承载力 F_y/kN	梁端屈服位移 δ_y/mm	极限承载力 F_u/kN	梁端极限位移 δ_u/mm	延性系数 μ
SP-1	104.298	14	239.919	57.314	4.1
SP-2	104.307	14	240.153	58.075	4.2
SP-3	104.204	14	238.207	57.248	4.1
SP-4	116.290	8	328.675	56.987	7.1
SP-5	110.510	8	325.935	55.695	6.9

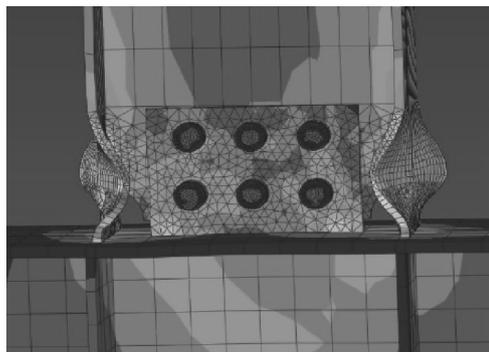
由图7及表4可以看出:在第一组试件中,不锈钢A4-80、A4-70和达克罗8.8级3种螺栓所对应的节点循环加载下弹性阶段的性能仍相当一致,屈服后受力情况也较为相似,极限承载力和延性系数亦比较接近;第二组试件中,螺栓连接与剪切板三面围焊俩节点循环加载下弹性阶段的性能仍相当一致,但是屈服后,三面围焊节点的极限承载力与延性系数相较于螺栓连接节点都有一定的提升.

因为有限元分析中不能考虑到材料自身

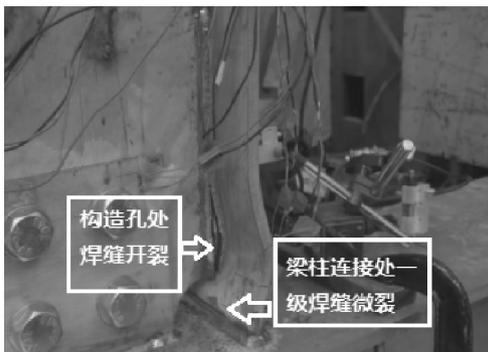
和焊缝缺陷的影响,所以模拟结果中显示节点的延性都较好.但是在实际工程中,为了充分发挥不锈钢材料的延性,焊接质量一定要有充分的保证,尽量减少焊接过程中出现的缺陷,另外,也可以适当地改进节点的局部构造和形式^[19-22],使节点的受力性能得到改善,减少节点焊缝脆性断裂的可能性.

3 有限元模拟与试验对比

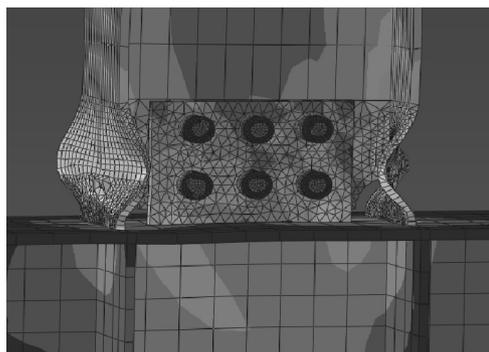
有限元模拟与试验结果对比如图8所示.



(a)SP-1有限元



(b)SP-1试验



(c)SP-2有限元



(d)SP-2试验

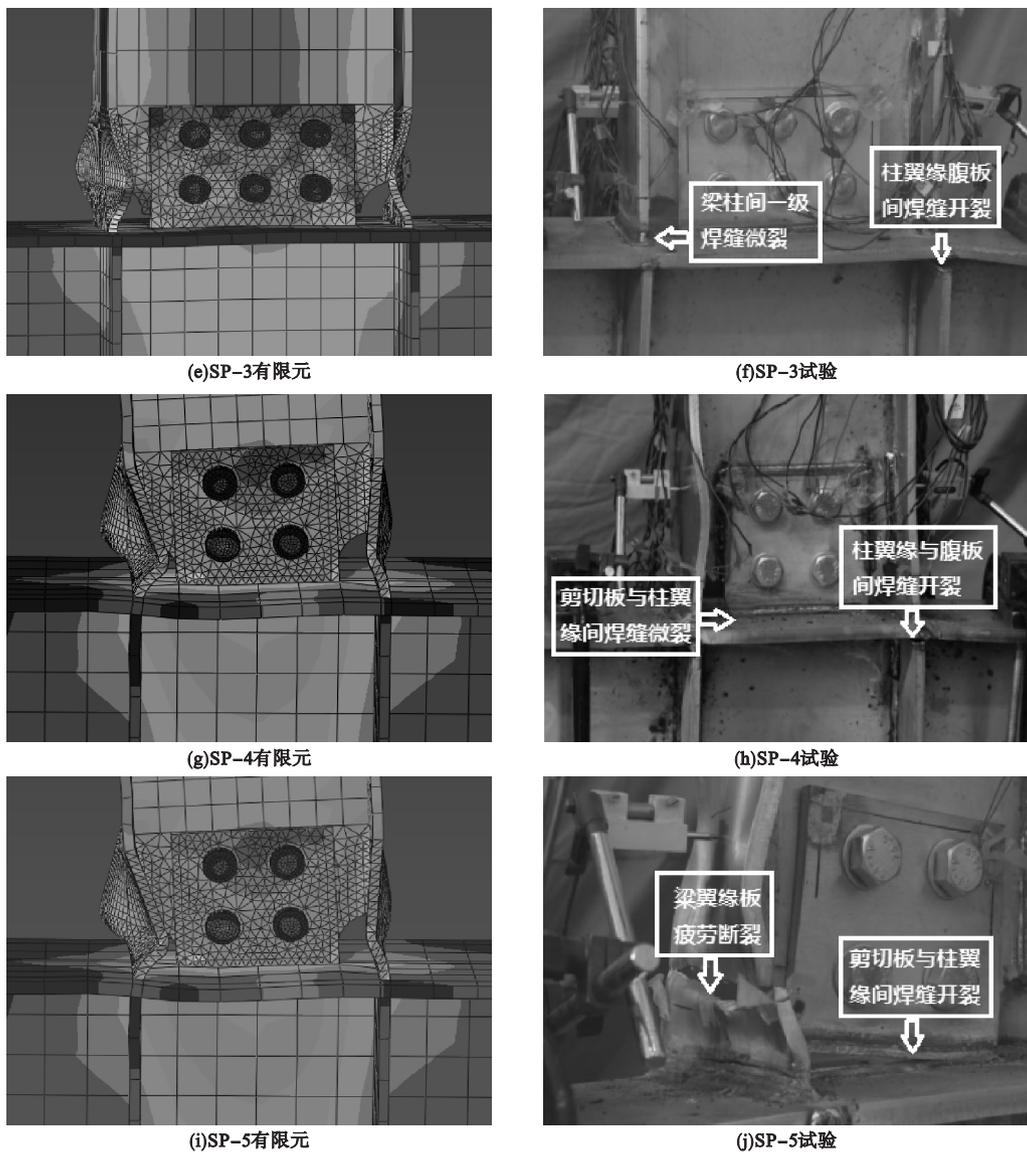


图8 模拟与试验现象对比图

Fig. 8 The comparison of experiment and FEM

因为试验中大多试件都是焊缝发生脆性断裂,所以曲线没有下降段,而有限元模拟中未考虑焊缝的影响,曲线会有明显的下降段,现取下降段之前的有限元模拟曲线段进行对比,通过分析图6~图8可以发现:

(1) 试验中与模拟中节点发生屈曲的位置基本相同,都发生在构造孔附近的梁翼缘板上;应力集中部位发生在梁柱连接处的一级焊缝和梁翼缘与腹板间构造孔处。

(2) 第一组中的3个试件SP-1~SP-3在破坏前的承载性能在模拟与试验中相差不

大,其中SP-3在试验中的承载力比预想的要大一些即要比SP-1和SP-2大一些,是因为介于前2个试件的破坏形态,后期在试验前对第三个试件的焊缝进行了补焊加强。

(3) 第二组的两个试件SP-5和SP-6在试验中的承载力比模拟中结果大,也是应为后期对这两个试件的焊缝进行了补焊加强,但是三面围焊试件破坏仍然发生在焊缝处,所以三面围焊的方法对焊缝有更高的要求。

(4) 两组试件在有限元模拟结果中,承

载力下降到85%后加载过程仍然在继续,所以最终的极限位移要比试验中的大,再加上试验中是焊缝发生脆性断裂,断裂后就停止了加载,所以梁翼缘板并未充分发挥不锈钢材料的优越延展性,对焊缝加强后,节点的抗震性能还会有所提高。

4 结 论

(1)第一组试件中不锈钢 A4-80、A4-70 及达克罗 8.8 级螺栓相对应的节点刚度与承载力都非常接近,节点连接处的焊缝区域先于梁截面达到屈服;三种形式节点的应力分布相差不大,应力集中在梁翼缘与腹板焊接孔交界处及剪切板焊缝两端。

(2)第二组试件中,普通栓焊与三面围焊俩节点前期承载性能与延性性能都非常接近,在后期破坏前,三面围焊表现出更好地延展性能。同第一组试件相似,应力集中在梁翼缘与腹板焊接孔交界处及剪切板焊缝两端。

(3)由于没有考虑焊接缺陷等因素的影响,S316L 不锈钢材梁柱节点的计算延性和耗能能力都较好,滞回曲线较为饱满,呈现梭形,并产生明显的下降段。

(4)由于不锈钢材料自身具有的良好延展性能,会导致在节点焊缝连接区域翼缘屈曲后不会类似于碳素钢节点翼缘板很快发生脆性断裂,而是翼缘屈曲后继续加载容易在焊接孔应力集中处使梁翼缘与腹板间的角焊缝被拉裂。

(5)由于螺栓种类对栓焊节点承载性能和抗震性能影响较小,所以综合考虑金属间的电化学锈蚀以及螺栓单价等因素,建议选用不锈钢 A4-70 螺栓应用于不锈钢梁柱栓焊节点中。

S316L 不锈钢节点在循环加载下对节点域板件间角焊缝的强度有更高的要求,但笔者中尚未考虑加强节点域的焊缝,因此,今后的研究方向可以是对节点域角焊缝提出新的适用于不锈钢材料的增大系数的节点模型进

行分析研究,得到更准确的节点承载力及延性特性。

参考文献

- [1] ZHAO O, GARDNER L, YOUNG B. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending - part 1: experiments and numerical modelling [J]. *Thin-walled structures*, 2016, 101: 231-239.
- [2] ZHAO O, GARDNER L, YOUNG B. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending - part 2: parametric studies and design [J]. *Thin-walled structures*, 2016, 101: 240-248.
- [3] 乔学良,王元清,贾连光,不锈钢结构梁柱连接节点的研究现状[J]. *工业建筑*, 2017, 17(增刊): 154-162.
(QIAO Xueliang, WANG Yuanqing, JIA Lian-guang. The applications and research of the stainless steel form of connections with welded flanges and bolted webs [J]. *Industrial construction*, 2017, 17(S): 154-162.)
- [4] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [5] 阎石,李康宁,张曰果,等. 翼缘削弱型钢筋混凝土框架梁柱节点受力性能试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2015, 31(2): 219-227.
(YAN Shi, LI Kangning, ZHANG Yueguo, et al. Experimental research on mechanical behavior of beam-column joints in reinforced concrete frame with weakened flanges [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2015, 31(2): 219-227.)
- [6] 叶列平,马千里,缪志伟. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(12): 102-113.
(YE Lieping, MA Qianli, LIAO Zhiwei. Study on weak beam-strong column design method of RC frame structures [J]. *Engineering mechanics*, 2010, 27(12): 102-113.)
- [7] YE L, QU Z, MA Q, et al. Study on ensuring the strong column-weak beam mechanism for RC frames based on the damage analysis in the

- Wenchuan earthquake [J]. Building structure, 2008, 38(11): 52-53.
- [8] LI Xinxia, GONG Maosheng, HAN Qinghua, et al. New factor to characterize mechanism of "strong column-weak beam" of RC frame structures [J]. Transactions of Tianjin university, 2015, 21(6): 484-491.
- [9] 胡方鑫, 施刚, 石永久, 等. 高强度钢材梁柱节点受力性能的有限元分析 [J]. 钢结构工程研究, 2012, 9(增刊): 383-396.
(HU Fangxin, SHI Gang, SHI Yongjiu, et al. FEM analysis on behavior of beam-column connections using high strength steel [J]. Research on steel structural engineering, 2012, 9(S): 383-396.)
- [10] JOH C, CHEN W F. Fracture strength of welded flange-bolted web connections [J]. Journal of structural engineering, 1999, 125(5): 565-571.
- [11] 王元清, 关建, 张勇, 等. 不锈钢构件螺栓连接摩擦面抗滑移系数试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(5): 769-774.
(WANG Yuanqing, GUAN Jian, ZHANG Yong, et al. Experimental research on slip factor in bolted connection with stainless steel [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(5): 769-774.)
- [12] SONG A L, RAN H D, SU M Z, et al. Finite element analysis on mechanic behavior of joints between elevated columns and truss columns in substation frame [J]. Applied mechanics & materials, 2013, 259(69): 949-953.
- [13] ZHANG Y F, ZHAO J H, CAI C S. Seismic behavior of ring beam joints between concrete-filled twin steel tubes columns and reinforced concrete beams [J]. Engineering structures, 2012, 39(6): 1-10.
- [14] ZHANG Y F, ZHAO J H, ZHANG D F. Force transference mechanism and bearing capacity of connection between composite CFST column and steel beam [J]. Journal of Chang'an university, 2015, 35(5): 82-88.
- [15] 东南大学. 不锈钢结构技术规程: CECS 410—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
(Southeast University. Specification for stainless steel structure technology: CECS 410—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.)
- [16] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
(SHI Yiping, ZHOU Yurong. ABAQUS detailed explanation of finite element analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.)
- [17] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ/T101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(Ministry of Construction of the PRC. Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ/T101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- [18] 石永久, 王萌, 王元清, 等. 钢框架改进型梁柱节点滞回性能有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 205-210.
(SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing, et al. FEM analysis on cyclic behavior of improved beam-column connection in steel frames [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(2): 205-210.)
- [19] 赵大伟, 石永久, 陈宏. 低周往复荷载下梁柱节点的试验研究 [J]. 建筑结构, 2000, 30(9): 3-6.
(ZHAO Dawei, SHI Yongjiu, CHEN Hong. Experimental research of beam-column connections under cyclic loading [J]. Journal of building structures, 2000, 30(9): 3-6.)
- [20] 石永久, 李兆凡, 陈宏, 等. 高层钢框架新型梁柱节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3): 2-7.
(SHI Yongjiu, LI Zhaofan, CHEN Hong, et al. Experimental research on cyclic behavior of new types of beam-column connections in high-rise steel frames [J]. Journal of building structures, 2002, 23(3): 2-7.)
- [21] 理素杰, 王珊, 白玉星, 等. 高层钢框架新型梁柱节点抗震性能试验研究 [J]. 钢结构, 2008(增刊): 279-288.
(LI Sujie, WANG Shan, BAI Yuxing, et al. Experimental research on cyclic behavior of new types of beam-column connections in high-rise steel frames [J]. Steel structure, 2008(S): 279-288.)
- [22] 王立鹏, 巩思锋. 钢筋混凝土梁电化学锈蚀及受弯承载力试验研究 [J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(2): 113-117.
(WANG Lipeng, GONG Sifeng. Study of electrochemical corrosion and bearing capacity of corroded reinforced concrete beams [J]. Journal of Shandong university (engineering science), 2009, 39(2): 113-117.)