

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.070

方钢管混凝土柱梁下栓上焊节点受力性能研究

戎 贤¹, 石晓娜¹, 陈 磊^{1,2}, 杜颜胜³, 张建新¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 同圆设计集团股份有限公司, 济南 250101;

3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:为研究带外环板的方钢管混凝土柱-H 形钢梁下栓上焊节点的受力性能,以梁上翼缘连接方式和梁截面尺寸为试验参数,设计制作了 3 个节点构件,并对其进行拟静力试验。引入了数字散斑相关方法(DSCM)测量系统,对节点核心区应变进行非接触式高精度测量。结果表明,受焊缝质量的影响,构件主要破坏位置都在焊缝附近,其中下栓上焊节点和全螺栓节点分别发生在梁上翼缘与外环板连接的焊缝处和下内隔板与柱连接的焊缝处;下栓上焊节点相对于全螺栓节点核心区变形更小,更符合“强柱弱梁”准则,并推断梁柱之间荷载传递主要通过外环板,但全螺栓节点由于螺栓滑移以及焊接缺陷少,延性要显著好于下栓上焊节点;梁截面尺寸和节点连接方式对构件核心区受力性能和应变分布有较大影响,其中核心区主应变及剪应变云图均呈 45°斜向发展。

关键词:结构工程;方钢管混凝土;梁柱节点;下栓上焊;外肋环板;受力性能;数字散斑相关技术

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)11-013-12

Mechanical behavior of the bottom flange bolted and top flange welded joints between concrete-filled steel tubular columns and steel beam

RONG Xian¹, SHI Xiaona¹, CHEN Lei^{1,2}, DU Yansheng³, ZHANG Jianxin¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China; 2. Tongyuan Design Group Co., Ltd., Jinan 250101, P. R. China;

3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of the bottom flange bolted and top flange welded joints with vertical stiffener between concrete-filled steel tubular columns and H-shaped steel beams, three joint members were designed and manufactured, and their pseudo-static tests were carried out with the connection mode of upper flange and the cross-section size of the beam as test parameters. At the same time, DSCM (digital speckle correlation method) measurement system was introduced to measure the strain in the core area of the node with non-contact high precision. The results show that the main damage locations of the components are near the weld due to the quality of the weld seam. The damage of the bottom flange bolted and top flange welded joints occurs at the weld joints of the upper flange and the outer ring plate of the beam, while the damage of the full bolt joints occurs at the weld joint between the inner

收稿日期:2019-06-04 网络出版日期:2022-06-15

基金项目:国家自然科学基金(51808182);河北省自然科学基金(E2017202278);天津市自然科学基金(20JCZDJC00370)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51808182), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2017202278) and Natural Science Foundation of Tianjin (20JCZDJC00370).

作者简介:戎贤(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事结构抗震研究,(E-mail) xrong516@126.com。

通信作者:陈磊,男,硕士研究生,主要从事结构抗震研究,(E-mail) 571813025@qq.com。

diaphragm and the column. The core area deformation of the bottom flange bolted and top flange welded joints is smaller than that of the full bolt joint, suggesting that it is more in line with the criterion of “strong column and weak beam”. It can be concluded that the load transfer between beam and column is mainly through the outer ring plate, but the ductility of full-bolted joints is significantly better than that of the bottom flange bolted and top flange welded joints due to the slippage of bolts and fewer welding defects. Moreover, beam cross-section size and joint connection mode have a greater impact on the stress performance and strain distribution in the core area, and the principal strain and shear strain nephogram in the core area develop obliquely at 45 degrees.

Keywords: structural engineering; square concrete-filled steel tubular; connection between columns and steel beam; bottom flange bolted and top flange welded; vertical stiffener; mechanical behavior; DSCM

节点是影响整个钢管混凝土结构强度、刚度及稳定性的关键部位^[1],国内外学者对钢管混凝土节点进行了大量研究。Hu 等^[2]通过对带贯通隔板的钢管混凝土梁柱节点的试验和理论研究,提出了一种能提高结构延性和强度的节点承载力贡献模型。邓芑等^[3]对 6 个钢管混凝土全螺栓节点和 1 个栓焊节点进行了拟静力试验,发现全螺栓节点的塑性变形能力更好。张爱林等^[4]研究了楼板对钢管混凝土全螺栓节点的影响,发现组合节点的初始转动刚度、承载力优于无楼板节点。陈志华等^[5]对带贯通隔板的下栓上焊梁柱节点的抗震性能进行了拟静力试验,发现圆孔型和焊接型节点都具有较好的延性和刚度。在当前的结构试验中,构件的应变一般通过应变片来测得,但应变片存在易损坏,测量范围小、精度低的缺点。而 DSCM(数字散斑相关方法)作为一种非接触式应变测试方法,能对整个散斑区域的应变、位移等进行相关测量,精度高且更易于操作,已被应用到土木工程领域材性试验及一些大型结构试验中^[6-7]。孙伟等^[8]利用 DSCM 技术对钢管混凝土框架钢加强环式梁柱连接的弯矩-转角关系进行了测试,发现该技术可以应用于精确测试发生较大刚体转动及变形的大型结构试验中。钱程等^[9]通过 DSCM 技术对狗骨式钢框架子结构底层节点应变场、节点域剪切变形等进行了分析,发现 DSCM 技术所测峰值应变值和变形等与传统测试方法测得的结果基本一致。Xiao 等^[10]用非接触式光学变形测量方法对输电塔加载试验的变形进行了监测,发现该方法能够满足输电塔荷载试验中变形测量的效率和精度要求。

结合钢管混凝土节点的研究^[11-15],文中提出了带外肋环板的下栓上焊隔板贯通节点,设计了 2 个下栓上焊节点及 1 个全螺栓节点进行拟静力试验,研究其受力性能。基于 DSCM 技术对核心区主应变和剪应变的应变场进行了监测,得到了整个节点核心区应变分布及变化情况,为今后带外肋环板的下栓上焊隔板贯通节点的研究与应用提供了相关参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

为研究下栓上焊节点的受力性能,试验共设计制作了 3 个构件。试件主要变化参数为梁截面的尺寸以及上翼缘连接方式,试件具体变化参数如表 1 所示。本构件的设计为十字型对称梁柱节点,上下柱高分别为 1.595 m 和 1.295 m,梁长为 1.8 m。其中,柱采用冷弯空心方形钢管,梁采用工字型钢,节点上部通过 2 个四边形带外倒角的外环板进行连接,并在柱和外环板上设置了贴板传递荷载,下部通过内隔板与梁下翼缘进行螺栓连接,图 1 为构件的具体几何尺寸及构造形式。此外,构件所用螺栓均为 10.9 级高强摩擦型螺栓,直径为 M20 与 M24,试验前按规范要求使用专用扭矩扳手进行了初拧和终拧。

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件编号	柱截面尺寸/mm	梁截面尺寸/mm	连接方式
JD1	□250×8	HN300×150×6.5×9	下栓上焊
JD2	□250×8	HN350×175×7×11	下栓上焊
JD3	□250×8	HN300×150×6.5×9	全螺栓

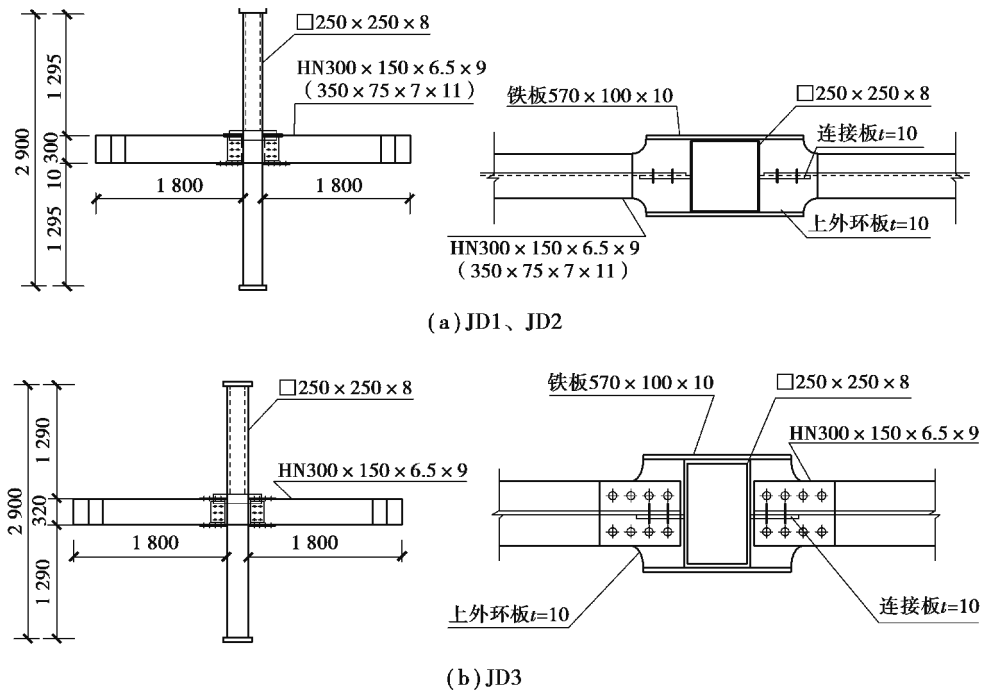


图 1 节点几何尺寸及构造

Fig. 1 Details and dimensions of specimens

1.2 加载制度及量测

图 2 为试验装置具体示意图,主要包括 DSCM 监测仪器、数据采集仪器、电液伺服作动器、液压千斤顶、反力墙和反力架等。在柱顶放置了 1 000 kN 液压千斤顶施加竖向轴力,并在柱的底端放置了球铰支座,梁的两端为自由端,各放置了 1 个 100 t 的作动器,施加反对称竖向荷载。梁端的竖向荷载和位移数值由作动器内置的荷载和位移传感器进行采集,自动绘制荷载-位移曲线。在柱核心区、贴板和连接板等位置设置了大量的应变花和应变片,用以研究核心区应变的变化规律以及梁柱节点的传力机理,图 3 为节点核心区应变片布置图。试验采用先力控制后位移控制的加载制度。

1) 在未施加梁端竖向荷载前,采用液压千斤顶在柱顶缓慢施加轴压至 770 kN;

2) 试件屈服前,采用荷载控制,并采用 20 kN 级差进行分级加载,每级荷载只循环 1 次。

试件屈服后,采用位移控制加载,位移值取试件屈服时对应的梁端竖向位移 Δ_y ,并以 $0.5\Delta_y$ 为极差控制加载,每级荷载循环 2 次。加载过程中,当梁端荷载下降到极限荷载的 85% 或者构件的破坏现象较为明显时,宣布构件破坏,结束试验。

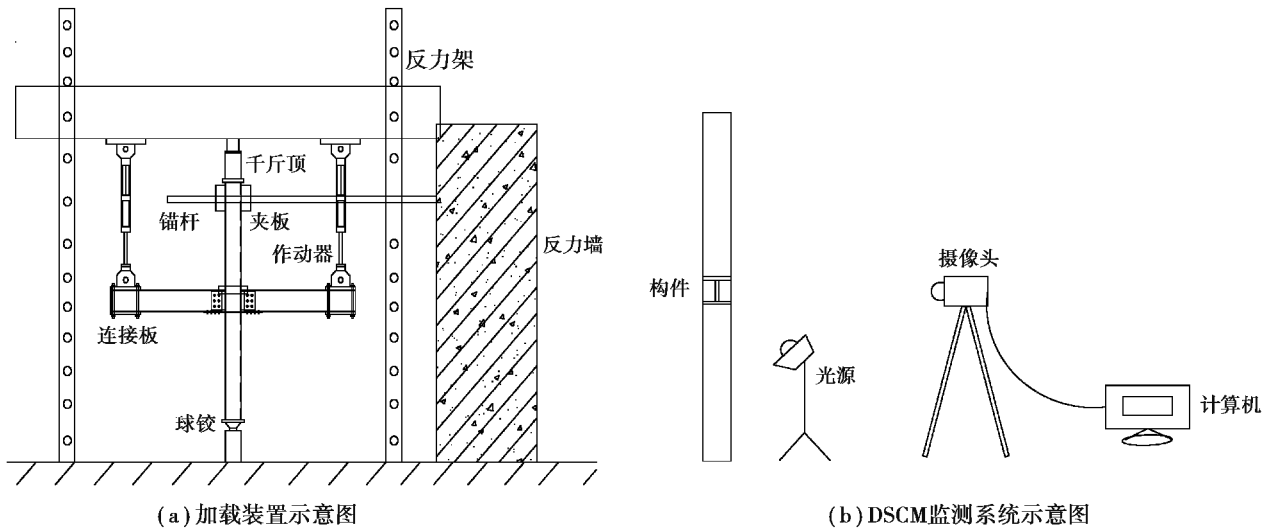


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic view of test setup

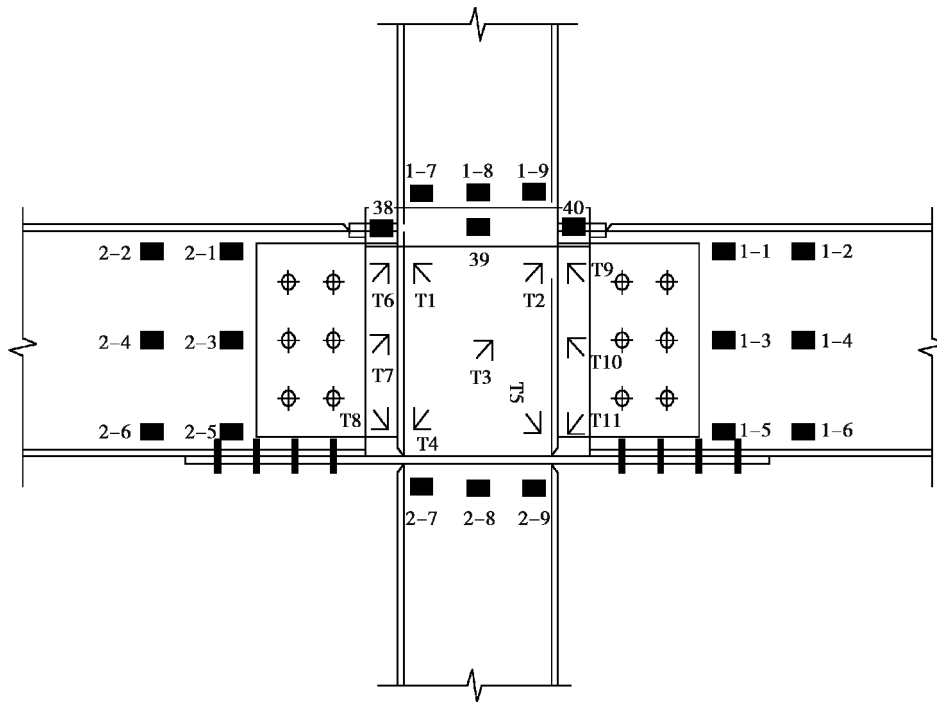


图 3 节点核心区应变片布置图

Fig. 3 Layout of strain gauges in the core area of joints

2 试验现象

试件出现了 2 种不同类型的破坏。第 1 种破坏类型发生在 JD1 和 JD2 两个下栓上焊节点,如图 4(a)所示,发生在梁两侧上翼缘焊缝附近,表现为随着梁端荷载的增加,梁左右两侧上翼缘焊缝处发生鼓曲并产生裂缝,最终裂缝持续发展直至完全断开,破坏过程中伴随着螺栓滑移以及连接板与柱壁连接处出现裂缝等破坏现象。第 2 种破坏类型发生在全螺栓节点 JD3,如图 4(b)所示,发生在内隔板与柱连接处附近,表现为随着梁端荷载的增加,梁左右两侧下翼缘发生鼓曲,内隔板与柱连接处出现裂缝并持续扩展,直至内隔板两侧裂缝贯穿,破坏过程中螺栓滑移更加明显,梁上翼缘也发生轻微鼓曲。2 种破坏类型主要发生破坏的部位都

在焊缝附近,说明焊缝质量的好坏对构件承载能力至关重要。



图 4 节点破坏形式

Fig. 4 Failure mode of specimens

3 延性分析

表 2 为 3 个构件骨架曲线特征值,可以看出,3 个节点的延性系数相对较小,下推时的延性系数明显小于上拉时的延性系数,这是由于焊接缺陷导致焊缝附近受拉时极易产生破坏。其中,JD2 在增加梁截面尺寸后,荷载的增长速率和极限荷载值显著增加,梁上翼缘焊接处过早发生破坏,导致 JD2 延性小于 JD1。全螺栓节点的延性系数显著大于下栓上焊节点,是由于全螺栓节点梁上下翼缘螺栓均有明显滑动,上翼缘螺栓连接减少了焊接缺陷,从而使全螺栓节点的延性显著高于下栓上焊节点。

表 2 试件骨架曲线特征值

Table 2 Characteristic values of skeleton curves

试件编号	荷载方向	屈服点		峰值荷载点		破坏点		$\mu = \Delta_u / \Delta_y$
		P_y / kN	Δ_y / mm	P_{\max} / kN	$\Delta_{\max} / \text{mm}$	P_u / kN	Δ_u / mm	
JD1	推	97.6	34.8	149.8	71.82	126.5	78.73	2.262
	拉	-128.6	-20.7	-147.3	-55.74	-102.4	-70.02	3.383
JD2	推	126.6	40.33	227.5	73.97	49.1	81.66	2.025
	拉	-163.2	-24.8	-209.0	-48.98	-185.1	-55.62	2.243
JD3	推	74.2	36.3	163.6	94.71	164.1	101.43	2.794
	拉	-96.2	-22.8	-136.8	-65.53	-115.5	-71.50	3.136

4 滞回性能分析

根据作动器内置位移和荷载传感器所记录的数据,可以得到 JD1~JD3 滞回曲线,如图 5 所示。分析滞回曲线,可以看出,3 个构件的滞回曲线都较为饱满,表现出良好的耗能性,但 JD2 在加载过程中荷载增长速率和极限荷载值显著增加,后期梁上翼缘发生突然破坏,导致荷载发生突变。随着梁端荷载及位移的逐级增加,JD1~JD3 翼缘和腹板的螺栓均出现滑移,体现出轻微的“捏缩”,由于 JD3 是全螺栓连接节点,没有梁上翼缘的焊接约束后,螺栓滑移的现象相对于其他 2 个节点更加严重,滞回曲线的“捏缩”也更加显著。各节点试件在破坏前,每次同级加载循环,梁端荷载比较接近,说明在往复荷载作用下,节点刚度退化不明显;随着梁端荷载及位移的逐级增加,钢管混凝土梁柱节点屈服的的范围逐渐增大,滞回曲线的切线斜率逐渐变小,说

明试件刚度在逐渐退化。

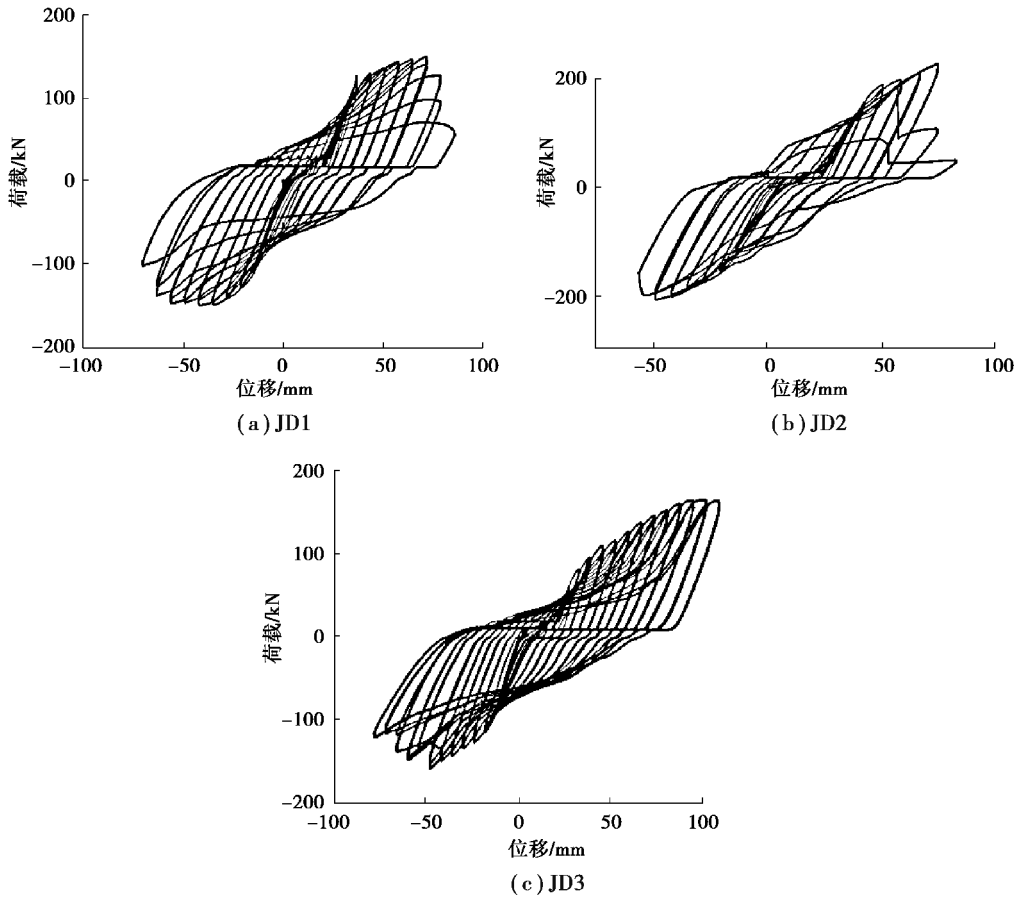


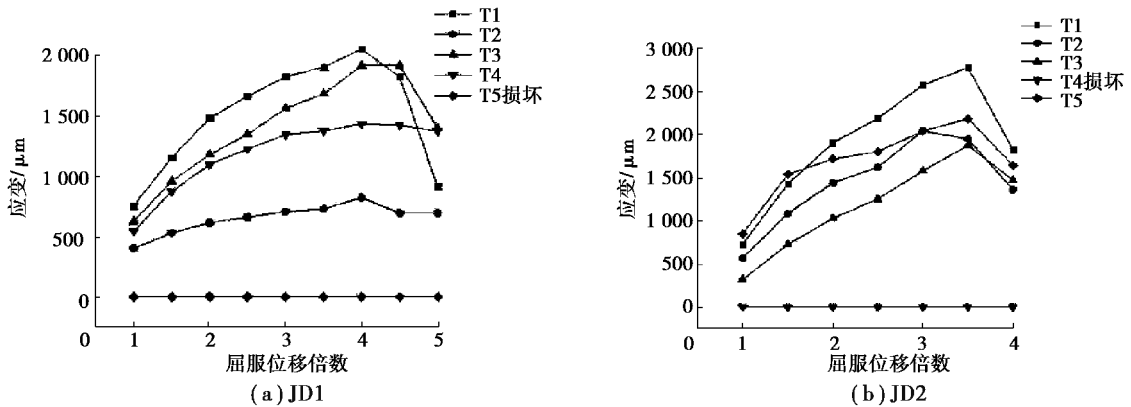
图 5 试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic loops of specimens

5 应变分析

5.1 钢管柱核心区主应变分析

图 6 为钢管柱核心区在荷载作用下应变花 T1~T5 的主应变变化情况。在加载前期,3 个构件主应变增长较快,当达到破坏位移之后,JD1 与 JD2 5 个测点的主应变均出现不同程度的下降,JD3 的主应变增长速率也明显降低。因为梁端发生破坏后,梁端施加的荷载明显降低,传递到核心区荷载同样也明显降低,使核心区的主应变出现不同程度的下降或者增长速率降低。下栓上焊节点 JD1 与 JD2 相对于全螺栓节点 JD3 主应变值明显降低,说明下栓上焊节点能有效减少核心区的变形,从而保护节点核心区不受破坏。



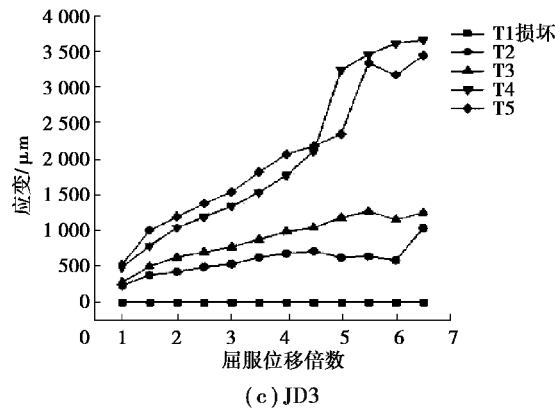


图 6 核心区主应变变化图

Fig. 6 Principal strain diagram of core region

5.2 腹板连接板主应变分析

图 7 为右侧腹板连接板在荷载作用下应变花 T9~T10 的主应变变化情况。在加载初期,构件连接板的 3 个测点主应变增长速率较为缓慢,随着荷载的增加,主应变增长速率不断增加。当达到破坏点时,JD1 与 JD2 上部的主应变开始急剧上升,而中部和下部的应变增长速率降低。因为加载后期腹板连接板与柱壁连接处下部出现裂缝,腹板连接板中下部能承受的荷载明显降低,主应变增长速率也随之下降,而且梁上翼缘产生贯通裂缝,后期已基本失去承载能力,导致连接板上部承受的弯矩和剪力显著增加,主应变值急剧上升。JD3 3 个测点在加载后期应变值显著增加,下部测点增加最为明显,主要是因为内隔板与柱壁连接处出现裂缝,承载力降低,使连接板所受的弯矩和剪力显著增加,连接板下部最为显著。

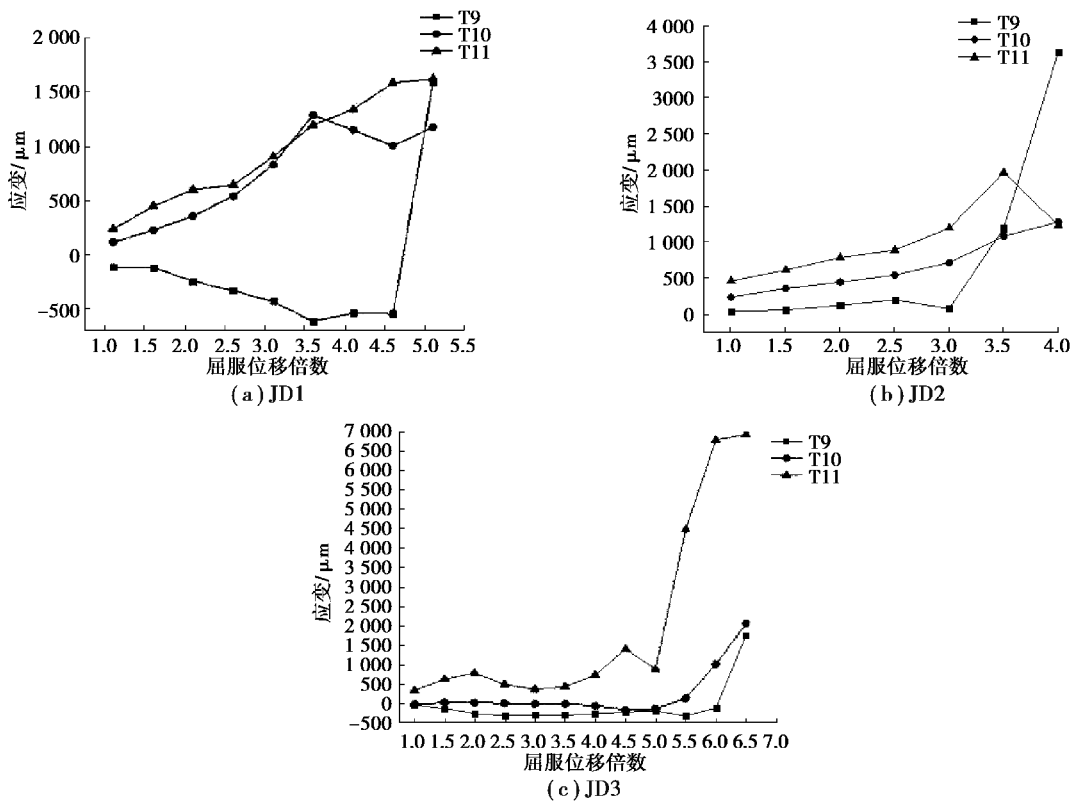


图 7 腹板连接板主应变变化图

Fig. 7 Principal Strain Diagram of Web Connecting Plate

5.3 贴板应变分析

图 8 为贴板在荷载作用下应变片 38~40 的应变变化情况。可以看出,JD1~JD3 3 个测点的应变值都较小,在整个加载过程中,应变值的变化幅度不大且没有明显的规律性,由此推断,在荷载由梁端向柱翼缘传递的过程中,主要是通过外环板进行传递,贴板所受的弯矩和剪力都较小。

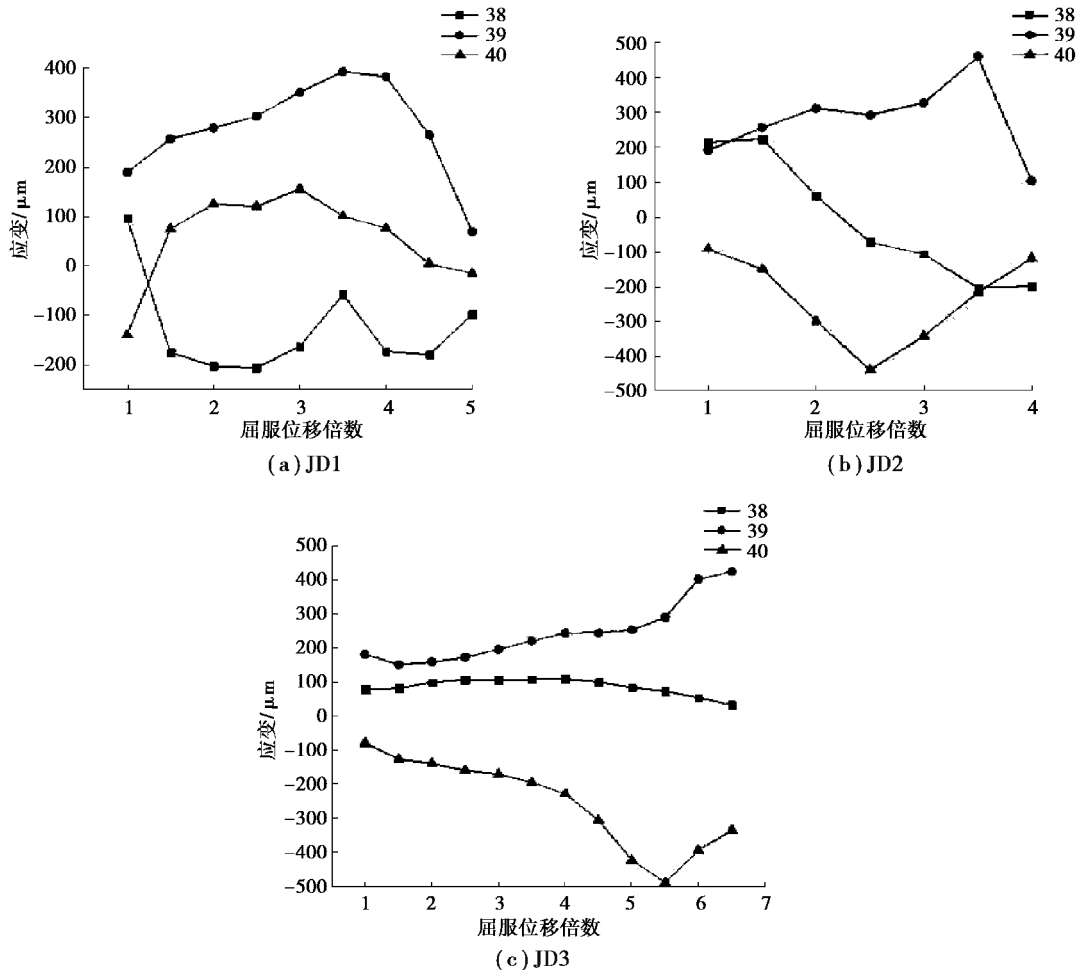


图 8 贴板应变变化图

Fig. 8 Strain diagram of Patch

6 核心区变形场演化

6.1 主应变变化规律

图 9 给出了 3 个构件在核心区左上方(应变花 T1 处)通过 DSCM 系统测出的主应变在整个加载过程中的变化规律。可以看出,主应变变化趋势符合拟静力试验加载规律,在加载过程中,应变不断增长,在卸载到反向加载过程中,应变不断降低,同时产生了残余应变。达到极限承载力之前,3 个构件目标点的主应变呈不断增长的趋势,达到极限承载力后直至破坏的过程中,主应变值有所降低。当达到极限承载力时,下栓上焊节点 JD1 和 JD2 主应变分别达到 $2\ 100\ \mu\epsilon$ 、 $2\ 700\ \mu\epsilon$,与应变花 T1 所测主应变值基本一致,表明通过 DSCM 测得的应变值真实可靠。全螺栓节点 JD3 由于加载的位移幅值较大,主应变达到 $3\ 100\ \mu\epsilon$ 。

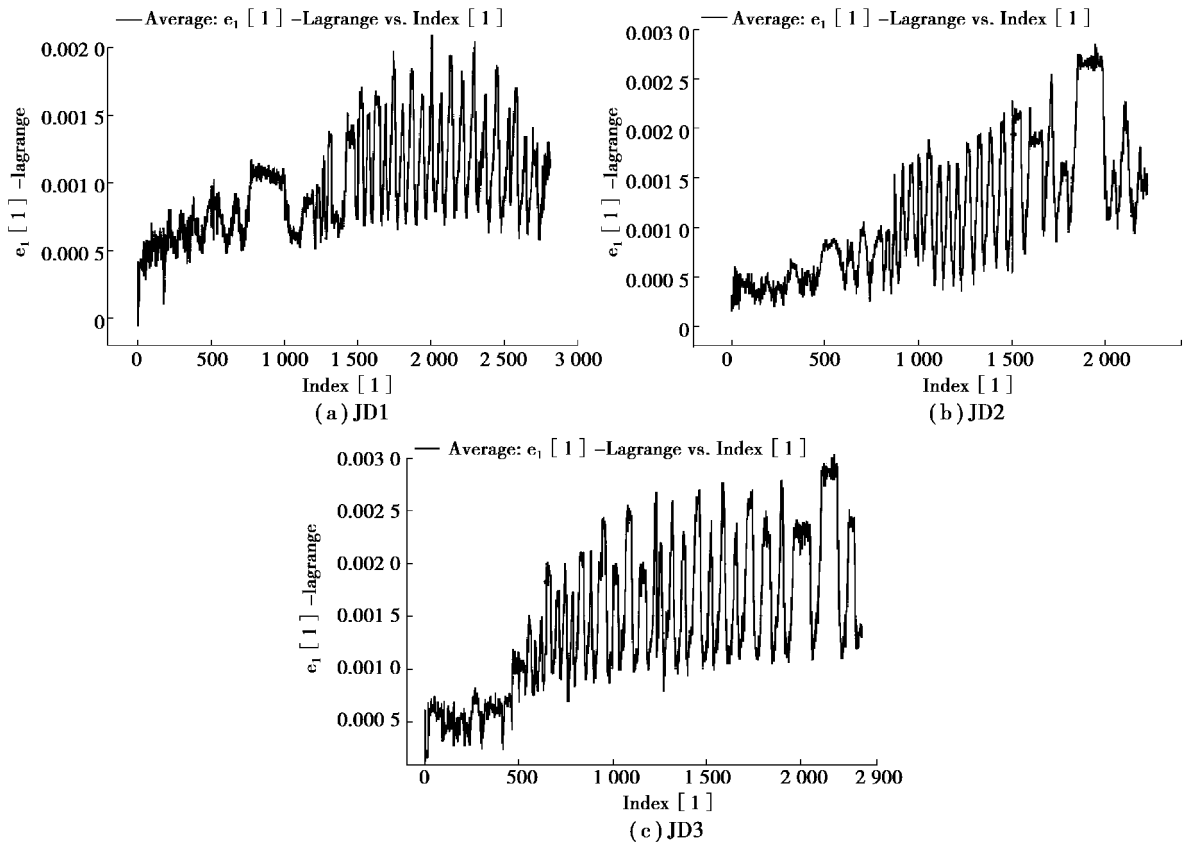
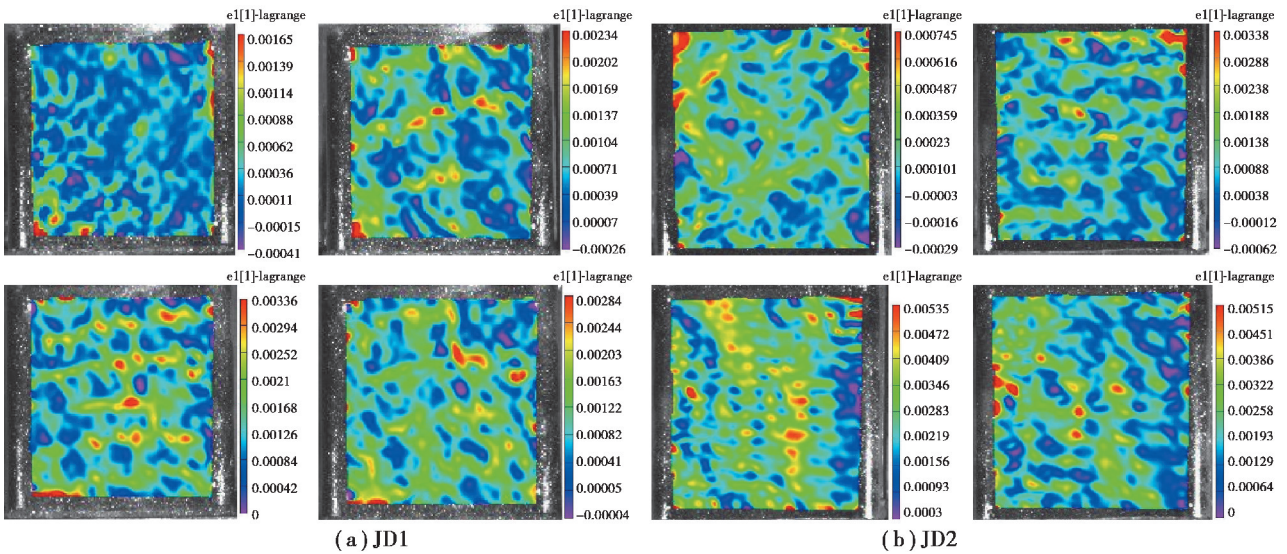


图 9 核心区 T1 处主应变变化曲线
 Fig. 9 Principal strain curve at T1 of core region

选取加载前的散斑图像作为参考,通过 DSCM 系统计算得到了施加轴力后、屈服点、极限承载力点以及破坏点 4 个时刻的核心区主应变云图^[16],图 10 给出了 3 个构件在 4 个典型时间点的核心区主应变云图。可以看出,在加载初期,主应变主要从核心区四周产生,核心区中间主应变较小,随着荷载的不断增加,最大主应变值与应变区域面积不断增加,而且主应变云图逐渐趋于呈 45°斜向分布,其中,JD2 和 JD3 加载过程中最大主应变分别是 JD1 的 1.6 倍和 2 倍。当构件破坏后,核心区所受荷载减小,最大应变及应变区域面积相对极限荷载时有所降低。



(a) JD1

(b) JD2

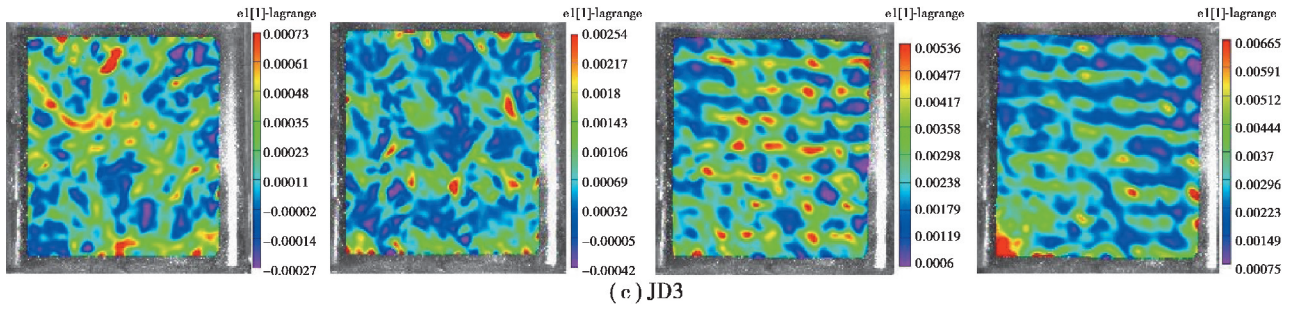


图 10 核心区主应变云图

Fig. 10 Principal strain nephogram of core region

6.2 剪应变变化规律

图 11 给出了 3 个构件在核心区左上方(应变花 T1 处)通过 DSCM 系统测出的剪应变在整个加载过程中的变化规律。可以看出,剪应变变化曲线与拟静力试验加载制度曲线变化规律基本一致,当梁端荷载向下进行加载时,该点产生了正向剪应变,反向加载时,该点产生负向剪应变。在极限承载力之前,每一个循环的剪应变最大值呈不断增长的趋势,当达到极限承载力之后,剪应变最大值有所降低。对于下栓上焊节点,JD1 最大正向剪应变在 $1\ 100\ \mu\epsilon$,最大负向剪应变在 $-1\ 400\ \mu\epsilon$,JD2 最大正向剪应变在 $1\ 800\ \mu\epsilon$,最大负向剪应变在 $-1\ 600\ \mu\epsilon$,由于梁上下翼缘并不对称,正负向剪应变变化曲线也不完全对称。而 JD3 上下翼缘均为螺栓连接,正负向剪应变变化曲线基本对称,最大正向剪应变在 $1\ 400\ \mu\epsilon$,最大负向剪应变在 $-1\ 400\ \mu\epsilon$ 。3 个节点剪应变值都较小,而且变化幅度不大,试验中核心区并没有明显变形,说明下栓上焊及全螺栓节点核心区所承受的荷载较小,核心区得到了较好的保护。

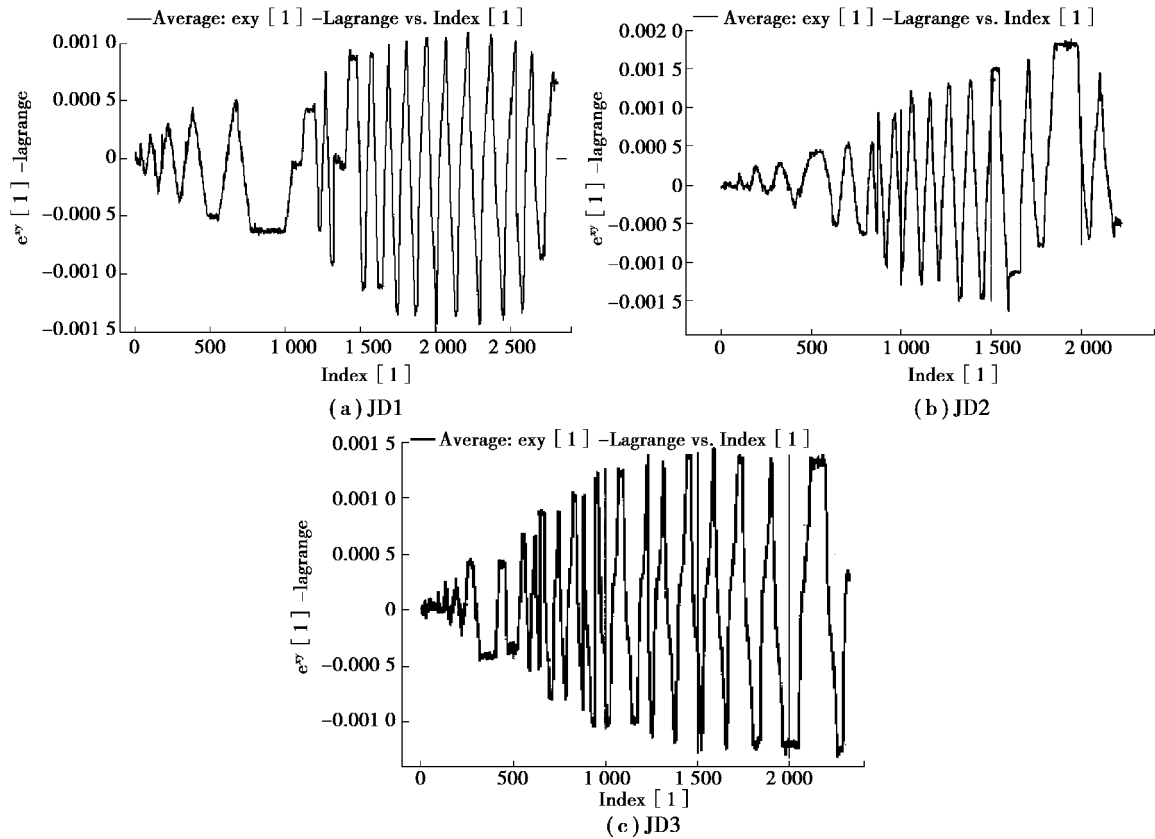


图 11 核心区 T1 处剪应变变化曲线

Fig. 11 Shear strain curve at T1 of core region

图 12 为选取加载前的散斑图像作为参考,通过 DSCM 系统计算得到的 4 个时刻(施加轴力后、屈服点、极限承载力点、破坏点)的核心区剪应变云图。可以看出,在加载初期,剪应变从核心区各个位置均有产生,随着荷载的不断增大,最大剪应变值与剪应变区域面积不断增加,而且剪应变云图逐渐呈 45° 斜向分布,核心区右侧剪应变大于左侧剪应变,JD2 和 JD3 加载过程中最大剪应变分别是 JD1 的 1.9 倍和 1.4 倍。当构件破坏后,核心区所受荷载减小,最大剪应变及应变区域面积相对于极限荷载时有所降低。

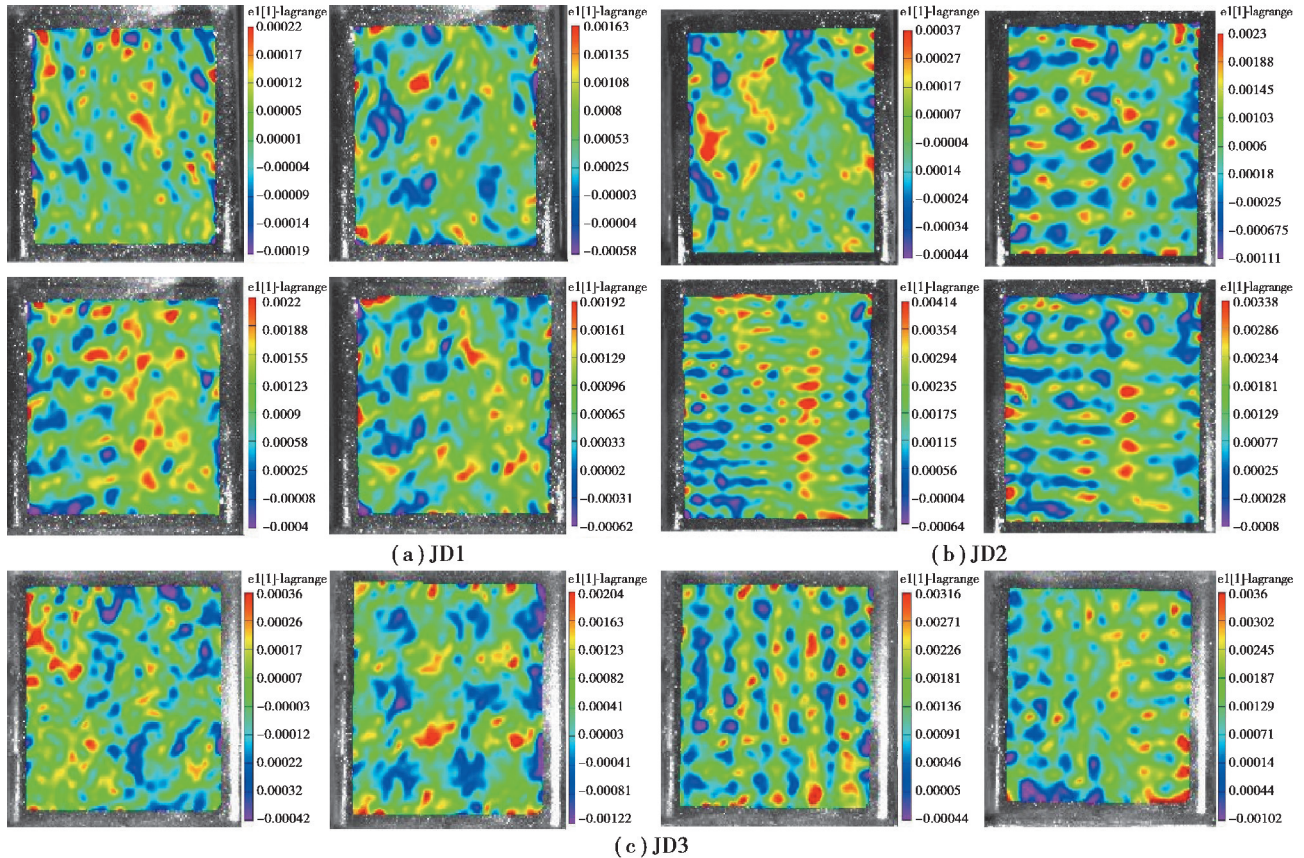


图 12 核心区剪应变云图

Fig. 12 Shear strain nephogram of core region

7 结 论

对 2 个下栓上焊外环板节点以及 1 个全螺栓节点进行了低周往复试验,通过分析相关试验现象和试验结果可以得到以下结论。

1) 构件破坏的位置都发生在梁端,核心区基本没有破坏现象,符合“强柱弱梁”的设计准则。下栓上焊节点与全螺栓节点的破坏形式有所不同,下栓上焊节点主要破坏位置为梁上翼缘与外环板连接的焊缝处,全螺栓节点破坏发生在下内隔板与柱连接的焊缝处,考虑是受焊接质量的影响,焊缝附近钢材强度降低并产生应力集中,使破坏位置都发生在焊缝附近。其中,全螺栓节点由于螺栓滑动及焊接缺陷少,延性显著好于下栓上焊节点。

2) 从应变分析可以看出,下栓上焊节点核心区的应变值比全螺栓节点降低,说明下栓上焊节点能有效减少核心区的变形;当梁上下翼缘发生破坏后,腹板连接板处所受荷载增加,应变增长明显;梁与柱连接处贴板所受荷载较小,变形也较小,由此推断梁柱之间主要靠外环板来传递荷载。

3) 随着荷载增加,主应变以及剪应变云图均呈 45° 斜向发展,应变范围及应变值也逐渐增加,主应变与剪应变在加载过程中发展趋势符合加载制度的规律。梁截面尺寸以及节点连接方式是梁柱节点受力性能的主要影响因素,当梁截面尺寸增加或连接方式为全螺栓连接时,最大主应变分别为对比构件的 1.6 倍和 2 倍,最大剪应变则分别为对比构件的 1.9 倍和 1.4 倍。

参考文献:

- [1] 黄俊. 钢管混凝土柱—钢梁下栓上焊隔板贯通节点抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Huang J. Research on seismic behaviour of the bottom flange bolted and top flange welded diaphragm-through connection between concrete filled tube column and steel beam[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [2] Hu J W, Kang Y S, Choi D H, et al. Seismic design, performance, and behavior of composite-moment frames with steel beam-to-concrete filled tube column connections[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2010, 10(2): 177-191.
- [3] 邓芃, 王来, 刘艳, 等. 方钢管混凝土柱与钢梁全螺栓节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(7): 19-28.
Deng P, Wang L, Liu Y, et al. Experimental study on seismic performance of concrete-filled square steel tubular column and steel beam with field-bolted connections[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(7): 19-28. (in Chinese)
- [4] 张爱林, 孙勇, 刘学春, 等. 方钢管混凝土柱—H形钢梁螺栓连接节点受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017(11): 68-77.
Zhang A L, Sun Y, Liu X C, et al. Experimental study on mechanical performance of concrete-filled square steel tubular columns to H-section steel beam bolted connection[J]. *Journal of Building Structures*, 2017(11): 68-77. (in Chinese)
- [5] 陈志华, 高悦, 于越, 等. 矩形钢管混凝土柱—H型钢梁下栓上焊隔板贯通节点抗震性能试验研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2018, 22(4): 42-49.
Chen Z H, Gao Y, Yu Y, et al. Research on seismic behavior of the bottom flange bolted and top flange welded diaphragm-through connection between rectangular concrete filled tube column and H-shaped steel beam[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2018, 22(4): 42-49. (in Chinese)
- [6] Sieffert Y, Vieux-Champagne F, Grange S, et al. Full-field measurement with a digital image correlation analysis of a shake table test on a timber-framed structure filled with stones and earth[J]. *Engineering Structures*, 2016, 123: 451-472.
- [7] 赵健. 数字散斑相关方法及其在工程测试中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Zhao J. Research on digital speckle correlation method and its applications in mechanical engineering measurement [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [8] 孙伟, 谢士华, 梁书亭, 等. 基于 DICM 的钢管混凝土框架梁柱连接的转角测量与分析研究[J]. *工程力学*, 2008(8): 169-174.
Sun W, Xie S H, Liang S T, et al. Study on measurement of intersection angles of frame connections between column and beam of concrete-filled steel tube using DICM[J]. *Engineering Mechanics*, 2008(8): 169-174. (in Chinese)
- [9] 钱程, 蒋明, 何源, 等. 基于图像相关分析的狗骨式钢框架子结构试验节点区变形场测量[J]. *实验力学*, 2017(3): 361-370.
Qian C, Jiang M, He Y, et al. Deformation field measurement of dog-bone steel frame substructure test joint area based on image correlation analysis[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017(3): 361-370. (in Chinese)
- [10] Xiao Z Z, Liang J, Yu D H, et al. Rapid three-dimension optical deformation measurement for transmission tower with different loads[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(9): 869-876.
- [11] Li B Y, Yang Y L, Chen Y F, et al. Behavior of connections between square CFST columns and H-section steel beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 145: 10-27.
- [12] Wu L, Chen Z, Rong B, et al. Panel zone behavior of diaphragm-through connection between concrete-filled steel tubular columns and steel beams[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(4): 627-641.
- [13] Qin Y, Chen Z, Yang Q, et al. Experimental seismic behavior of through-diaphragm connections to concrete-filled rectangular steel tubular columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 93(1): 32-43.
- [14] Ahmadi M M, Mirghaderi S R. Experimental studies on through-plate moment connection for beam to HSS/CFT column [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 161: 154-170.
- [15] Rezaifar O, Younesi A. Experimental study discussion of the seismic behavior on new types of internal/external stiffeners in rigid beam-to-CFST/HSS column connections[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 136: 574-589.
- [16] 朱戈. 复式钢管混凝土外环板节点滞回性能与核心区应变研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
Zhu G. Study on hysteretic behavior and strain in panel zone of composite concrete filled steel tubular joint with external stiffening ring[D]. Beijing: North China University of Technology, 2018. (in Chinese)