

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.04.005

BRS 板部分自复位连接新型卷边 PEC 柱-钢梁组合 框架边节点抗震机理试验

方有珍,赵帅领,徐 飞,金 晶,汪逸萍

(苏州科技大学土木工程学院,江苏 苏州 215011)

摘要: 为了研究 BRS 板部分自复位连接新型卷边 PEC 柱-钢梁组合框架边节点的抗震性能,对考虑 PEC 柱布置方式和柱顶竖向力的 3 个缩尺试件进行水平低周往复荷载下的抗震性能试验研究。基于试验结果,从试件的承载力、刚度衰减规律、自复位功效、耗能能力和节点传力机理等方面分析试件的抗震机理。研究结果显示:(a)BRS 板部分自复位连接可通过 BRS 板屈服耗散地震能和预拉杆实现自复位功效,且整个加载过程中结构主要构件处在弹性状态。(b)PEC 柱顶竖向力明显提高了其初始抗弯刚度,且其二阶效应加快了连接的耗能发展进程,而 PEC 柱的布置对初始抗弯刚度、刚度退化和耗能发展进程影响较小。(c)试件 SYJ1 加载至中震层间侧移限值 1/50 时其残余相对侧移角小于 0.005 rad,而加载至大震层间侧移限值 1/30 时其残余相对侧移角仍小于 0.01 rad,表明该试件具有极佳的自复位功效;试件 SYJ3 的自复位功效稍劣于试件 SYJ1,前者在加载至中震层间侧移限值 1/50 之前时自复位功效尚好,但加载后期其自复位功效退化明显。

关键词: 建筑结构;卷边 PEC 柱-钢梁组合框架;部分自复位连接;BRS 板耗能;自复位功效;水平低周往复荷载试验;抗震机理

中图分类号:TU398 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)04-0309-08

Experimental study on seismic mechanism of new PEC column-steel beam joint with partial self-centering BRS connection

FANG Youzhen, ZHAO Shuailing, XU Fei, JIN Jing, WANG Yiping

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to investigate the seismic performance of the joint of a new PEC column-steel beam frame with a partial self-centering BRS energy-dissipation connection, the axial compression on the top of the PEC column and its layout were taken into consideration to design three reduced-scale specimens, and tests were conducted with low-cycle reversed lateral loading. Based on the experimental results, the seismic mechanisms of specimens were analyzed in terms of the load-carrying capacity, bending stiffness degradation, self-centering function, energy-dissipation capacity, and force-transfer mechanism of the joint. The results indicate that: (a) Partial self-centering BRS connectivity can provide self-centering functionality through dissipation of earthquake energy and reduction of structural response, and the main components are in the elastic state throughout the loading process. (b) The axial compression on the top of the PEC column significantly increases the initial bending stiffness, and accelerates the energy dissipation process, while the layout of the PEC column has little effect on the initial bending stiffness, stiffness degradation, and energy dissipation process. (c) The residual drift angle of specimen SYJ1 is less than 0.005 rad when the loading drift reaches the interstory drift limit of 1/50 at the medium earthquake level and 0.01 rad when the loading drift reaches the interstory drift limit of 1/30 at the maximum earthquake level, indicating its sound self-centering functionality. The self-centering functionality of specimen SYJ3 is slightly inferior to that of

收稿日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(51478286,51078247);江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人培养对象项目(苏教师[2014]23 号);江苏省“六大人才高峰”高层次人才计划(JZ-033)

作者简介: 方有珍(1972—),男,安徽望江人,教授,博士,主要从事钢-混凝土组合结构抗震性能研究。E-mail:fyz72@mail.usts.edu.cn

SYJ1, and the self-centering functionality of specimen SYJ3 is strong before the loading drift reaches the interstory drift limit of 1/50, but degenerates significantly in the late stage of loading.

Key words: building structure; PEC column-steel beam frame; partial self-centering connection; energy dissipation of BRS plate; self-centering function; low-cycle reversed loading test; seismic mechanism

常规建筑物在经历地震后,一旦出现明显的残余变形或主要受力构件遭受严重破坏,将加大震后修复难度和大幅度提高修复成本,甚至导致其使用功能不满足而失去修复继续使用的价值,因而控制建筑结构震后残余变形和保证结构主要受力构件不出现严重破坏是提高其抗震性能和降低震后修复成本的关键,由此促使了自复位结构(self-centering structure)这种新型结构形式的诞生。自复位结构主要通过合理设置预拉杆以实现结构震后自行复位、减小残余变形、延缓主要受力构件损伤进程,同时增设辅助耗能元件来保证结构耗散地震能力,为此成为目前结构工程抗震领域的研究热点。

迄今为止,国外学者对自复位结构性能研究系统、成果丰富,而国内相关研究还处在初步阶段,成果相应匮乏。Ricles 等^[1-2]于2002年和2007年钢管混凝土柱-钢梁(宽翼缘)采用上、下双角钢为耗能元件的自复位连接进行试验研究和有限元分析,结果显示:该连接在循环荷载作用下具有较大的弹性刚度、较高的极限承载能力和良好的耗能能力;主体构件梁柱未出现损伤;侧移达到4%时连接仍未出现残余变形,具备良好自复位能力;试验结果与现行设计规范估算结果基本吻合。Chou 等^[3]于2006年对采用钢梁上、下翼缘加强板作为耗能元件的钢梁-钢管混凝土柱自复位连接结构体系进行试验研究,结果证实:在层间侧移达到4%时结构仍未出现极限承载力衰减和自复位功能的失效。Ikenaga 等^[4]于2006年提出了通过设置耗能元件耗能的柱脚自复位连接形式,并进行了拟静力抗震性能试验研究,对轴压比、钢绞线直径和初始预拉力大小等设计参数的影响规律进行分析,结果表明:相对转角小于0.02 rad时,柱脚表现出良好的自复位功效;当相对转角大于0.02 rad时,钢绞线的预应力出现一定程度的损失,柱脚自动复位功能降低。Chi^[5]于2009年提出采用防屈曲钢板(BRS)自复位的柱脚连接形式,地震作用下,柱脚与基础接触面分离,BRS板屈服耗散地震能量,避免了框架柱脚形成塑性铰,研究结果进一步显示:在水平相对侧移达到5%时BRS板仍具备耗能能力,且震后预拉杆也能实现连接有效复位,连接性能保持良好。

近年来,方有珍等^[6-7]、夏腾云等^[8]在常规PEC柱研究基础上提出了新型卷边钢板组合截面PEC柱并对其受力性能进行了系列研究,结果显示:新型卷边钢板组合截面PEC柱不仅维持了原有PEC柱的受力性能优势(增大构件的抗压承载力和水平抗侧刚度、较大幅度改善构件的抗震延性),且消除了常规PEC柱双向刚度差异明显和拉结筋设置造成施工不便的缺陷。此外,PEC柱还能较好地满足SC结构对竖向传力构件抗侧刚度与承载能力要求,且为预拉钢绞线的锚固提供了可靠保障。2014年杨永龙等^[9]、方有珍等^[10]又提出了设置有限长度预拉杆的部分自复位连接形式,并对采用BRS板部分自复位连接的新型PEC柱-钢梁中节点进行抗震性能试验研究和数值模拟,结果表明:试件通过BRS板可有效实现其耗能能力;连接转角达到中震层间侧移角限值0.02 rad,其残余转角小于0.005 rad,即使连接转角超过大震层间侧移角限值0.035 rad,其残余转角仍不超过0.01 rad,即连接实现了自复位功效、耗能能力与安全冗余度三者的有机协调。

笔者基于课题组提出的部分自复位连接的设计思想,为了系统研究部分自复位连接的抗震性能,取新型卷边PEC柱-钢梁组合框架中层边节点作为研究对象,考虑PEC柱布置方式、PEC柱竖向力2个参数,设计制作3个BRS耗能板部分自复位连接的新型卷边PEC柱-钢梁组合框架边节点试件并进行水平低周往复荷载下的抗震性能试验研究,以揭示其抗震机理。

1 试验概况

1.1 试件设计

取层高3.6 m的新型PEC柱-钢梁组合框架中层边节点作为研究对象,截取与节点相连的上下柱与梁反弯点间(中层柱反弯点取柱中间截面处,梁反弯点取距端部1/4~1/3跨相应截面处)子结构为试件原型。

以PEC柱布置方式和柱顶竖向力作为设计参数,并考虑试验室加载设备的加载能力,按1:1.6缩尺比例设计制作3个试件。卷边PEC柱钢构架采用Q235B钢板(翼缘为310 mm×5 mm的钢板且端部卷边30 mm,腹板为240 mm×5 mm的钢板)焊接组合截面,填充混凝土为C25;钢梁选用Q345工字钢I25 a;BRS板

采用 Q235B 钢板加工焊接;加强盖板利用 Q345 工字钢 I25a 剖分而成;BRS 板与 PEC 柱采用 10.9 级 M20 对穿螺栓连接,而与梁翼缘和加强盖板采用 10.9 级 M18 螺栓连接(预紧力设计值取 10 kN);自复位预拉杆采用 10.9 级 M20 长螺杆,其预紧力设计值为 100 kN;SYJ1 和 SYJ2 为 PEC 柱强轴与钢梁连接,SYJ3 为 PEC 柱弱轴与钢梁连接,实体试件见图 1。PEC 柱钢构架组合截面和梁翼缘/腹板各取 3 个材性试样,材性实测值见表 1;每批混凝土预留 3 个标准试块(150 mm×150 mm×150 mm),实测立方体强度平均值 $f_{cu,m}=28.12\text{ MPa}$ 。



图 1 试验试件

Fig.1 Test specimens

1.2 试验方案

1.2.1 测试设备布置

为了获取用于研究采用 BRS 板部分自复位连接的 PEC 柱-钢梁组合框架边节点抗震性能的关键数据,试验测试仪表布置见图 2(位移计 DT1 和 DT2 的量程为 300 mm,位移计 DT3 ~ DT7 的量程皆为 100 mm)。位移计 DT1、DT2 与 DT7 测量 PEC 柱顶和底的侧移量;梁翼缘布置

表 1 试件材性实测指标

Table 1 Measured material properties of specimens				
试样	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 $E/10^5\text{ MPa}$	伸长率 $\delta/\%$
钢板组合截面翼缘与腹板(Q235)	294.0	414.0	2.01	22.80
I25a 翼缘与腹板(Q345)	425.1	603.4	2.27	21.30
BRS 板(Q235)	297.4	450.8	2.13	23.03

位移计测量节点连接转动角,其中位移计 3 和 4 测量节点连接转动变形,位移计 5 和 6 测试连接转动变形;应变花(位于节点区中心:竖向应变片 1、45°应变片 2 和水平应变片 3)测量节点区剪切变形,应变花(位于 BRS 板前排螺栓间梁腹板中部:竖向应变片 4、45°应变片 5 和水平应变片 6)测量梁端剪切变形,而 BRS 板前排螺栓端部梁截面应变片 7(梁上翼缘内侧)、8(梁腹板中部)和 9(梁下翼缘内侧)用于判别梁截面受力状态。

1.2.2 加载方案与加载制度

为了实现试件理想边界条件,课题组专门设计了 3 个平面铰支座以达到反弯点铰接的效果,试验在苏州科技大学江苏省结构工程重点实验室四连杆加载架上采用液压伺服系

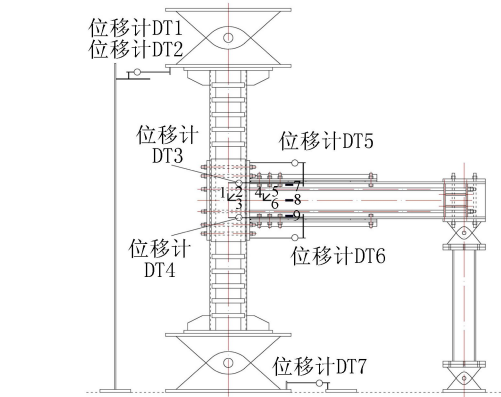


图 2 测试仪表布置

Fig.2 Arrangement of measuring instruments

统对 PEC 柱顶进行水平位移加载,所有试件正式加载之前均需实施预加载,以检查测试仪表是否工作正常,随后除试件 SYJ2 先在 PEC 柱顶施加至恒定竖向力($N=1\,000\text{ kN}$)后再进行水平加载外,其余试件均直接进行水平加载,水平加载制度参照国外相关文献^[11],考虑到实际地震的特点(小震频遇、大震罕遇),见表 2(注:9 级之后的每级按照相对侧移 0.5% 递增)。

表 2 试验加载制度

Table 2 Loading protocol for tests							
加载级	加载位移/ mm	相对侧移 $\delta'/\%$	循环 次数	加载级	加载位移/ mm	相对侧移 $\delta'/\%$	循环 次数
1	7.5	0.375	6	6	40	2.0	2
2	10.0	0.500	6	7	50	2.5	2
3	15.0	0.750	6	8	60	3.0	2
4	20.0	1.000	4	9	70	3.5	2
5	30.0	1.500	2				

注:相对侧移 $\delta'=\Delta/H$, Δ 为柱顶作动器位移, H 为 PEC 柱上下铰支座中心轴间距离。

2 试验现象

所有试件在加载过程中受力发展进程基本一致:加载初期(至相对侧移 1.0% 级之前),对穿螺栓与预拉杆的预应力使 PEC 柱与 BRS 板和 BRS 板与梁和盖板对应接触面处在消压状态,接触面紧密接触,且试件组成元件均处在弹性状态,见图 3(a);继续加载至相对侧移 1.0% 级,BRS 板与梁和盖板对应接触面完成消压,梁端受拉部位与 BRS 板接触面脱开,见图 3(b);随后加载往后推进,梁端受拉部位 BRS 板开始发挥屈服并不断发展,相应梁端受拉部位与 BRS 板脱开现象不断加剧,且 BRS 板与钢梁接触面间出现明显相对滑移,而卸载至零时,各试件连接出现不同程度的残余变形,见图 3(c)与 3(d);加载至超过大震层间相对侧移限值 1/30~1/20 要求的相对侧移 5.5% 级,试验宣告结束。

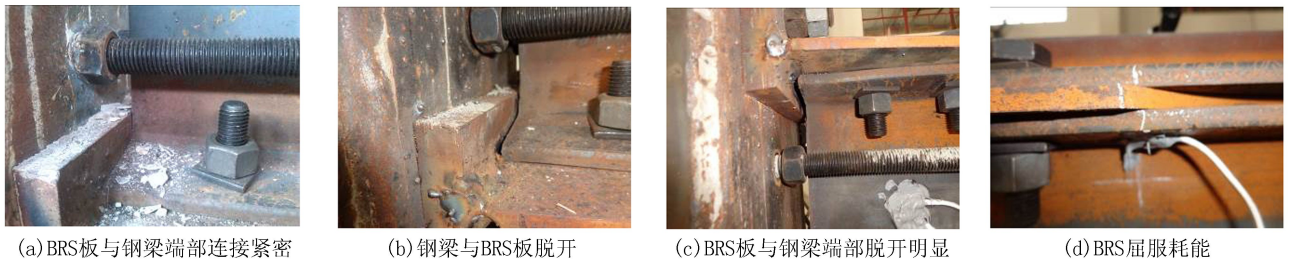


图 3 试验观测

Fig.3 Observation of tests

3 试验结果分析

3.1 试件滞回曲线

为了研究 BRS 板耗能部分自复位连接的新型卷边 PEC 柱-钢梁边节点的抗震性能,基于试验测试数据,得出试件梁端弯矩与实测相对侧移角和节点连接转角滞回曲线并加以分析。

3.1.1 梁端弯矩-实测相对侧移角滞回曲线

根据梁柱节点处弯矩平衡条件,则梁端弯矩 $M=PH+N_{总}\Delta_1$,实测相对侧移角 $\theta=\Delta_1/h$,其中 P 为 PEC 柱顶水平荷载, $N_{总}$ 为 PEC 柱顶加载梁自重 $G(70\text{ kN})$ +竖向力 N , Δ_1 为位移计实测位移, H 为试件 PEC 柱上下支座转轴间距离, h 为柱下部铰支座转轴到柱顶端板间距离(见图 2)。通过试验数据得到的 $M-\theta$ 滞回曲线见图 4。

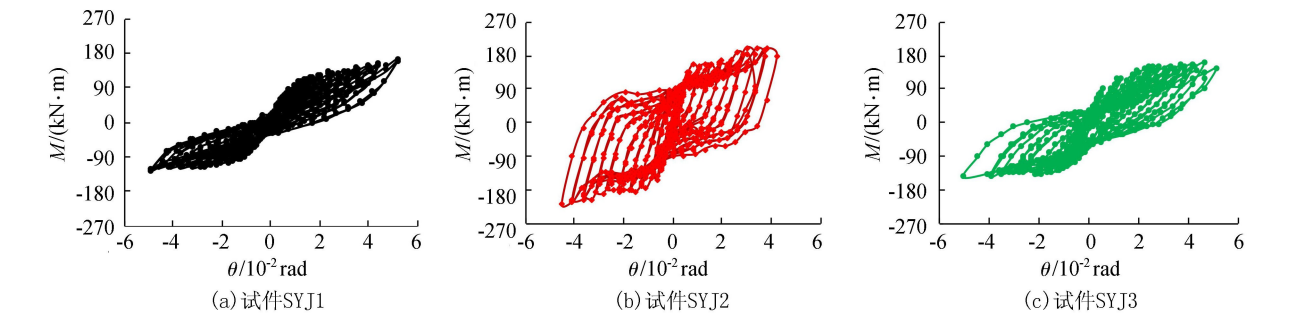


图 4 M-θ 滞回曲线

Fig.4 Hysteretic loops of M-θ

图 4 中显示:试件 SYJ1 位移加载至相对侧移 5.5% 级的第 1 个循环时,推、拉方向最大实测相对侧移角分别为 0.0519 rad 和 -0.0486 rad,对应的最大承载力分别为 165.58 kN·m 和 -123.49 kN·m;试件 SYJ2 位移加载至相对侧移 5.0% 级的第 1 个循环时,推、拉方向最大实测相对侧移角分别为 0.0422 rad 和 -0.0449 rad,对应的最大承载力分别为 179.55 kN·m 和 -220.74 kN·m;试件 SYJ3 位移加载至相对侧移 5.5% 级的第 1 个循环时,推、拉方向最大实测相对侧移角分别为 0.0513 rad 和 -0.0503 rad,对应的最大承载力分别为 145.06 kN·m 和 -144.06 kN·m。此外,从图 4 中看出:(a)所有试件加载初期,梁端处于消压状态,节点转动变形主要来自于预拉杆的弹性变形,试件整体完好。(b)试件 SYJ1 由于 PEC 柱强轴与钢梁连接能更好地满足“强柱弱梁”的抗震要求,整个加载过程中具有良好的自复位功效。(c)试件 SYJ2 柱顶恒定竖向力明显提高了试件

的初始刚度,但随着加载的进行,其二阶效应加快了试件的受力损伤进程,导致试件自复位功效明显下降。
(d) 试件 SYJ3 柱由于 PEC 柱弱轴抗侧刚度较强轴偏弱,相应延缓了自复位连接受力发展进程和小幅度降低了试件的自复位功效。

3.1.2 梁端弯矩-节点连接转角滞回曲线

框架结构体系整体性能取决于梁柱节点的连接性能,为此对位移计和实测数据进行整理(节点连接转角 $\theta_1=\Delta_2/h'$,其中 Δ_2 为位移计 4 与位移计 3 实测数据的差值; h' 为位移计 3 与 4 的间距),得到试件的 $M-\theta_1$ 滞回曲线,见图 5。

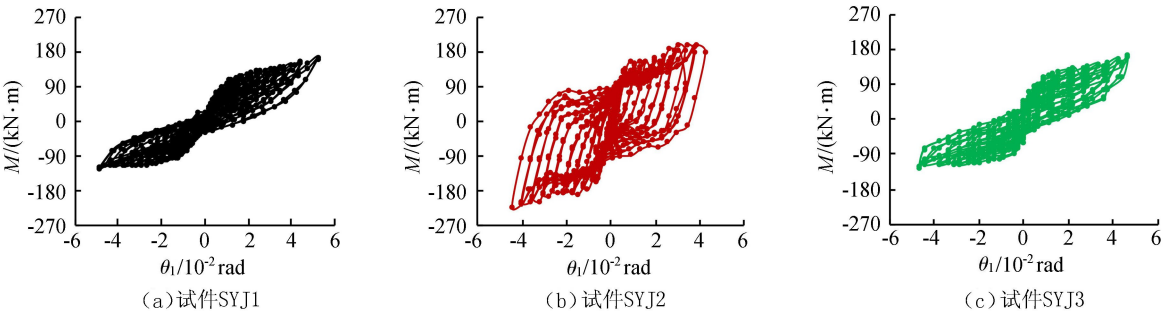


图 5 $M-\theta_1$ 滞回曲线
Fig.5 Hysteretic loops of $M-\theta_1$

对图 5 加以分析可知,所有节点连接滞回曲线特征与实测相对侧移角滞回曲线基本相同:加载初期,对穿螺栓和预拉杆预应力对接触面产生的预压力未消除,试件整体处在弹性状态,节点连接残余转角近似为零;继续加载至梁端与 BRS 板接触面脱离前期,BRS 板开始屈服,预拉杆自复位功效发挥较好,试件节点连接滞回曲线捏缩明显;加载后期,BRS 板屈服向周边拓展,梁端与 BRS 板接触面脱离明显,试件构件出现了不同程度的损伤,预拉杆自复位功效出现不同程度的退化,其中试件 SYJ1 退化最慢,而试件 SYJ2 退化最明显。

3.2 转动刚度退化

节点转动刚度退化规律是节点连接受力损伤进程的直观反映。为了清晰显示循环荷载作用下节点转动刚度的退化规律,参照文献[12-13]引入 2 种转动刚度:(a) 等效转动刚度 K_{eq} ,即加载力为零的起始点与加载峰值点连线斜率, K_{eq-A} 和 K_{eq-B} 分别表示同一加载滞回环推拉方向等效转动刚度;(b) 峰值转动刚度 K_p ,即同一加载滞回环推拉方向加载峰值点连线斜率,见图 6。

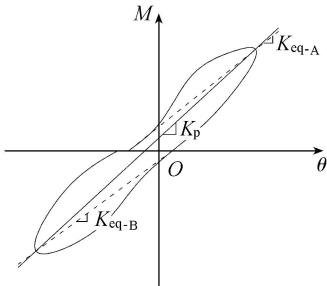


图 6 转动刚度示意
Fig.6 Sketch of rotational stiffness

节点等效转动刚度平均值 $\bar{K}_{eq-A}$ 、 $\bar{K}_{eq-B}$ 分别取计算加载级对应 K_{eq-A} 和 K_{eq-B} 的平均值,试件峰值转动刚度平均值 $\bar{K}_p$ 取计算加载级对应 K_p 的平均值。依据 $M-\theta_1$ 滞回曲线,计算得到各试件节点加载阶段的 $\bar{K}_{eq-A}$ 、 $\bar{K}_{eq-B}$ 和 $\bar{K}_p$ 衰减规律见图 7、图 8。

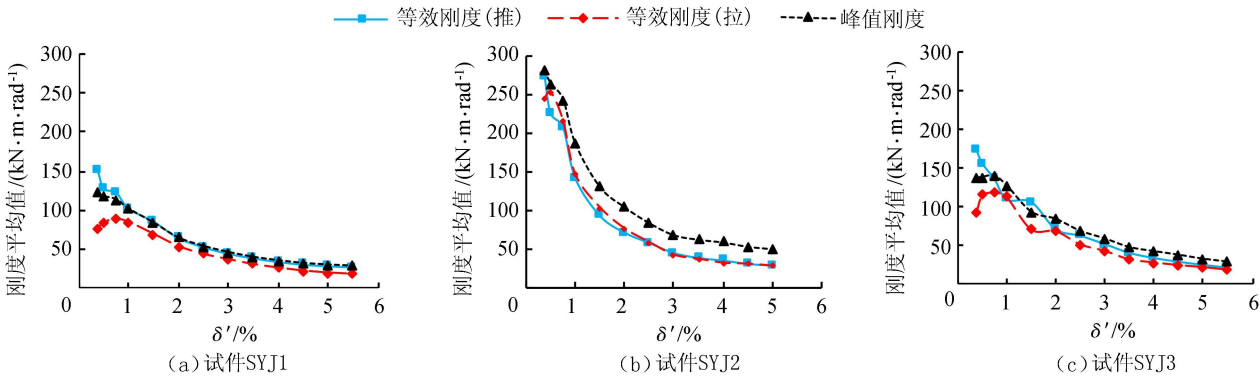


图 7 节点转动刚度退化曲线
Fig.7 Rotational stiffness degradation curves of joints

对图 7 分析发现:(a)加载初期,所有试件推拉方向等效转动刚度存在一定差异,主要在于试件连接间隙导致先行加载推方向刚度相对后拉方向小;随着加载进行,初期缺陷的影响所占比重降低,推拉方向刚度逐步趋向一致。(b)所有试件推拉方向等效转动刚度与峰值转动刚度差异不明显,表明部分自复位连接节点自复位捏缩效果较好。(c)PEC 柱布置对试件初始转动刚度和转动刚度退化规律影响较小,表明新型卷边 PEC 柱双向刚度接近相等,且 PEC 柱施加顶竖向明显增大了试件初始转动刚度,但随着加载进程发展,影响逐渐消退。

图 8 表明:(a)试件 SYJ1 和 SYJ3 初始峰值转动刚度分别为 $122.48\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 和 $136.88\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$,而试件 SYJ3 初始峰值转动刚度为 $281.14\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$,即 PEC 柱布置对试件初始转动刚度影响较小,PEC 柱施加顶竖向明显增大了试件的初始转动刚度。(b)所有试件加载初期,对穿螺栓和预拉杆预应力对接触面产生的预压力未消除,试件整体处在弹性状态,峰值转动刚度衰减缓慢。(c)所有试件随着加载的继续,BRS 板耗能段截面先后出现屈服并不断发展,峰值转动刚度呈现明显衰减趋势,其中试件 SYJ2 衰减最快,主要在于轴压力的二阶效应加快了 BRS 板的屈服进程。(d)所有试件加载后期,BRS 板耗能段截面屈服充分且向周边扩展,峰值转动刚度基本趋向一致。

3.3 试件残余变形

结构卸载后的残余变形反映了其受力损伤水平,也是评定自复位结构抗震自复位功效的关键指标。由于本文重点研究部分自复位连接节点的抗震机理,为此根据 $M-\delta$ 滞回曲线对试件残余相对侧移角(即为每个加载级所有循环推拉卸载至零的残余相对侧移角平均值)进行进一步分析,以揭示试件的自复位功效,计算结果见图 9。

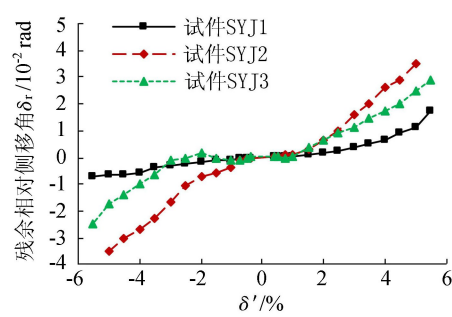


图 9 残余相对侧移角发展规律
Fig.9 Change of residual drift angle

分析图 9 可知:(a)加载初期,所有试件预拉杆和对穿螺栓预紧力使得试件梁端受拉翼缘处在消压状态,所有接触面密闭,试件整体处在弹性状态,卸载试件弹性恢复而基本回位;继续加载至 BRS 板开始屈服过程中,首先梁端受拉部位与 BRS 板接触面消压完成并开始脱开,紧接着梁端受拉与接触的 BRS 板克服静摩擦力而产生相对滑移,随后 BRS 板开始产生拉伸弹性变形至出现屈服,且整个过程中预拉杆使试件基本实现了完全复位;随后继续加载,BRS 板耗能段屈服充分发展并逐渐向周边扩展,试件损伤程度加剧,预拉杆自复位效果减退,试件残余相对侧移角增大。(b)整个试验过程中,试件 SYJ1 自复位功效最佳,残余相对侧移较小,在加载至中震层间侧移限值 $1/50^{[14]}$ 时其残余相对侧移角小于 0.005 rad ,而在加载至大震层间侧移限值 $1/30^{[11]}$ 时其残余相对侧移角仍小于 0.01 rad ;试件 SYJ3 自复位功效稍弱,该试件在加载至中震层间侧移限值 $1/50$ 之前,自复位功效尚可,但随后加载中其自复位功效衰减加快。

3.4 滞回耗能

结构耗能能力是反映结构抗震延性的重要指标,可通过滞回曲线中滞回环包括的面积(滞回耗能)进行评定^[15]。本文试验试件采用的 BRS 耗能板部分自复位连接主要利用 BRS 板来满足试件耗散地震能的需求,为此对 $M-\delta$ 滞回曲线的滞回环面积进行计算,每个加载级取对应滞回环面积平均值,计算结果见图 10。分析图 10 可发现:(a)试件 SYJ2 耗能发展明显快于另外 2 个试件,主要由于 PEC 柱顶恒定竖向力的二阶效应显著加快了试件耗能的发展进程。(b)采用 PEC 柱弱轴布置的试件 SYJ3 前期耗能发展与试件 SYJ1 一致,而后期耗能进程加快,进一步证明新型卷边 PEC 柱能更好地满足竖向构件“双向等刚度”的设计要求,而弱轴受弯边缘混凝土

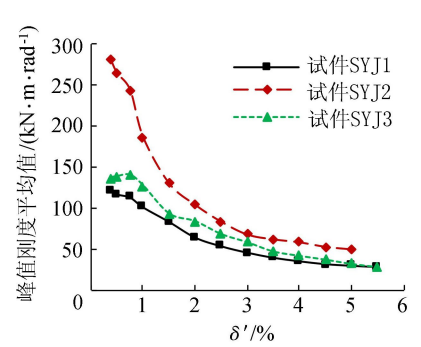


图 8 节点峰值刚度退化曲线
Fig.8 Peak stiffness degradation curves of joints

分析图 9 可知:(a)加载初期,所有试件预拉杆和对穿螺栓预紧力使得试件梁端受拉翼缘处在消压状态,所有接触面密闭,试件整体处在弹性状态,卸载试件弹性恢复而基本回位;继续加载至 BRS 板开始屈服过程中,首先梁端受拉部位与 BRS 板接触面消压完成并开始脱开,紧接着梁端受拉与接触的 BRS 板克服静摩擦力而产生相对滑移,随后 BRS 板开始产生拉伸弹性变形至出现屈服,且整个过程中预拉杆使试件基本实现了完全复位;随后继续加载,BRS 板耗能段屈服充分发展并逐渐向周边扩展,试件损伤程度加剧,预拉杆自复位效果减退,试件残余相对侧移角增大。(b)整个试验过程中,试件 SYJ1 自复位功效最佳,残余相对侧移较小,在加载至中震层间侧移限值 $1/50^{[14]}$ 时其残余相对侧移角小于 0.005 rad ,而在加载至大震层间侧移限值 $1/30^{[11]}$ 时其残余相对侧移角仍小于 0.01 rad ;试件 SYJ3 自复位功效稍弱,该试件在加载至中震层间侧移限值 $1/50$ 之前,自复位功效尚可,但随后加载中其自复位功效衰减加快。

分析图 9 可知:(a)加载初期,所有试件预拉杆和对穿螺栓预紧力使得试件梁端受拉翼缘处在消压状态,所有接触面密闭,试件整体处在弹性状态,卸载试件弹性恢复而基本回位;继续加载至 BRS 板开始屈服过程中,首先梁端受拉部位与 BRS 板接触面消压完成并开始脱开,紧接着梁端受拉与接触的 BRS 板克服静摩擦力而产生相对滑移,随后 BRS 板开始产生拉伸弹性变形至出现屈服,且整个过程中预拉杆使试件基本实现了完全复位;随后继续加载,BRS 板耗能段屈服充分发展并逐渐向周边扩展,试件损伤程度加剧,预拉杆自复位效果减退,试件残余相对侧移角增大。(b)整个试验过程中,试件 SYJ1 自复位功效最佳,残余相对侧移较小,在加载至中震层间侧移限值 $1/50^{[14]}$ 时其残余相对侧移角小于 0.005 rad ,而在加载至大震层间侧移限值 $1/30^{[11]}$ 时其残余相对侧移角仍小于 0.01 rad ;试件 SYJ3 自复位功效稍弱,该试件在加载至中震层间侧移限值 $1/50$ 之前,自复位功效尚可,但随后加载中其自复位功效衰减加快。

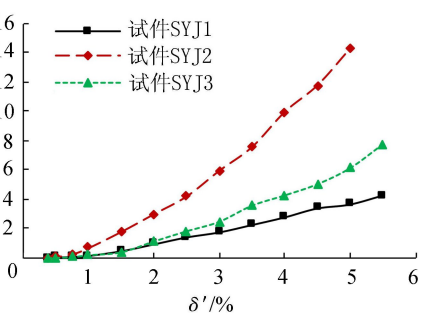


图 10 滞回耗能发展进程
Fig.10 Development process of hysteretic energy

较强轴边缘钢板易于损伤耗能,以致后期耗能发展快于试件 SYJ1。

4 节点传力机理

框架结构的梁柱节点区位于梁柱交接部位的柱中,在梁传来的内力作用下容易发生剪切破坏。通过对试件节点区应变花(竖向应变片 1、45°应变片 2 和水平应变片 3)测试数据按相关公式计算,得出试件 SYJ1、SYJ2 和 SYJ3 的节点区最大剪应变分别为 0.807×10^{-3} 、 0.653×10^{-3} 和 0.41×10^{-3} ,即剪切变形极小,主要源于试件增设的节点加强板提高了对节点区混凝土的约束作用,从而提高了节点区刚度,更好地实现了“强节点”的抗震设计要求。参考文献[9-10],本文试件节点传力机理为:预拉杆和预拉对穿螺栓将梁截面受拉部分的拉力转化为另一侧对节点区的压力,使节点区形成了混凝土斜压带传力模式,充分发挥了增设节点板的节点区约束混凝土抗压性能的优势,有效降低了节点区剪切性能的要求,更好地满足了“强节点弱构件”的抗震设计原则。节点传力机理见图 11。

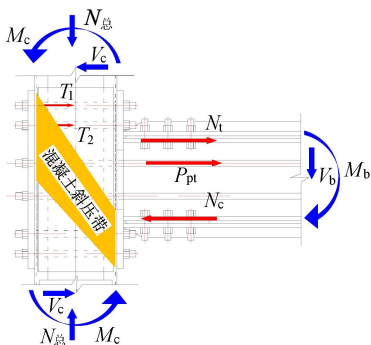


图 11 节点区传力机理
Fig. 11 Force transfer mechanism of panel zone

5 结 论

- a. BRS 屈服耗能板部分自复位连接通过设置预拉杆和辅助 BRS 板以实现其部分自复位功效和满足结构耗散地震能的需求,且保证了结构主要受力构件基本处在弹性状态。
- b. PEC 柱顶竖向力大幅度提高了试件初始转动刚度,其二阶效应明显加快试件损伤耗能进程。
- c. 新型卷边 PEC 柱截面布置对初始转动刚度、刚度退化和初期耗能发展进程影响极小,充分表明新型卷边 PEC 柱更好地满足竖向构件“双向等刚度”的设计要求。
- d. 整个试验过程中,试件 SYJ1 自复位功效最佳,在加载达到中震层间侧移限值 1/50 时其残余相对侧移角小于 0.005 rad,在加载达到大震层间侧移限值 1/30 时其残余相对侧移角仍小于 0.01 rad;试件 SYJ3 自复位功效稍差于试件 SYJ1,而试件 SYJ3 在加载至中震层间侧移限值 1/50 之前自复位功效尚可,但随后加载其自复位功效衰减加快。
- e. 由于试验中发现 PEC 柱顶竖向力明显加快了预拉杆自复位功效的衰减,为此建议对预拉杆预应力度进行进一步研究,以得到更合理的设计取值。

参考文献:

[1] RICLES J, SAUSE R, PENG S W, et al. Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections[J]. Journal of Structure Engineering, 2002, 128(7): 850-859.

[2] RICLES J, SAUSE R. Earthquake resistant post-tensioned connections to concrete filled HSS columns[C]//JOHN W W. Proceedings of the ASCE 2007 Structures Congress. Long Beach(CA, USA):ASCE, 2007.

[3] CHOU Chungche, CHEN Junhen, CHEN Y, et al. Evaluating performance of posttensioned steel connections with strands and reduced flange plates[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamic, 2006, 35(9): 1167-1185.

[4] IKENAGA M, NAGAE T, NAKASHIMA M, et al. Development of column bases having self-centering and damping capability [C]//MAZZOLANI F M, WADA A. Proceedings of the Fifth International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas STESSA 2006. Yokohama, Japan;Taylor & Francis, 2006.

[5] CHI H. Development of post-tensioned column base connection for self-centering seismic resistant steel frame[D]. West Lafayette, USA: Purdue University, 2009.

[6] 方有珍,陆承铎,马吉,等. 新型卷边钢板组合截面 PEC 柱(弱轴)滞回性能足尺试验研究[J]. 土木工程学报,2013,46(1):24-33. (FANG Youzhen, LU Chengduo, MA Ji, et al. Experimental study on hysteretic behavior of PEC columns(weak axis)fabricated with crimping thin-walled built-up section by full scale[J]. Journal of Civil Engineering, 2013, 46(1):24-33. (in Chinese))

[7] 方有珍,马吉,陆承铎,等. 新型卷边钢板组合截面 PEC 柱(强轴)滞回性能试验研究[J]. 工程力学,2013,30(3):181-190. (FANG Youzhen, MA Ji, LU Chengduo, et al. Test study on hysteretic behavior of PEC columns(strong axis)fabricated

with crimping thin-walled built-up section[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3):181-190. (in Chinese))

[8] 夏腾云,方有珍,张怀卿,等. 相关设计参数对新型卷边薄壁钢板组合 PEC 柱受力性能的影响[J],兰州理工大学学报, 2013,39(6):118-123. (XIA Tengyun, FANG Youzhen, ZHANG Huaiqing, et al. Influence on mechanical performance of partial design parameters of PEC columns fabricated with crimping thin-walled built-up section[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(6):118-123. (in Chinese))

[9] 杨永龙,方有珍,赵凯. 新型 PEC 柱(弱轴)-钢梁节点 BRS 耗能板部分自复位连接抗震性能研究[J]. 苏州科技学院学报(工程科学版),2014,27(4):47-53. (YANG Yonglong, FANG Youzhen, ZHAO Kai. Study on seismic performance of PEC column fabricated with crimping thin-walled built-up section-steel beam joint with BRS plate connection[J]. Journal of Suzhou University of Science & Technology (Engineering and Technology), 2014, 27(4):47-53. (in Chinese))

[10] 方有珍,杨永龙,陈赟,等. 新型 PEC 柱-钢梁 BRS 耗能部分自复位节点的抗震性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015,36(5):598-603. (FANG Youzhen, YANG Yonglong, CHEN Bing, et al. Test study on seismic performance of new crimping PEC column-steel beam interior joint with partial post-tensioned BRS energy-dissipation connection[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2015,36(5):598-603. (in Chinese))

[11] MATHEW D S. Seismic testing and analytical studies for development of new seismic force resisting systems for metal buildings [D]. San Diego (CA, USA): University of California, 2013.

[12] 方有珍,顾强,姚江峰,等. 新型卷边钢板组合 PEC 柱-钢梁中节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(7):53-62. (FANG Youzhen, GU Qiang, YAO Jiangfeng, et al. Experimental study on seismic performance of new PEC column fabricated with crimping thin-walled built-up section-steel beam interior connections[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7):53-62. (in Chinese))

[13] 方有珍,顾强,陆森强,等. 新型 PEC 柱-钢梁 T 形焊接加强型中节点抗震性能试验研究[J]. 实验力学,2016,31(1):103-112 (FANG Youzhen, GU Qiang, LU Senqiang, et al. Experimental Investigation on node seismic performance of a new PEC column-steel beam with T-shape welding strengthened connection[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(1):103-112. (in Chinese))

[14] Federal Emergency Management Agency. FEMA 273 NEHRP commentary on the guidelines for the rehabilitation of buildings [S]. Washington:Federal Emergency Management Agency,1996.

+++++

· 简讯 ·

“六五”世界环境日

1972 年 6 月 5 日联合国在瑞典首都斯德哥尔摩召开了联合国人类环境会议,会议通过了《人类环境宣言》,并提出将每年的 6 月 5 日定为“世界环境日”。同年 10 月,第 27 届联合国大会通过决议接受了该建议。世界环境日(World Environment Day)的确立,反映了世界各国人民对环境问题的认识和态度,表达了人类对美好环境的向往和追求。它是联合国促进全球环境意识、提高政府对环境问题的注意并采取行动的主要媒介之一。联合国环境规划署每年 6 月 5 日选择一个成员国举行“世界环境日”纪念活动,发表《环境现状的年度报告书》及表彰“全球 500 佳”,并根据当年的世界主要环境问题及环境热点,有针对性地制定每年的“世界环境日”主题。

联合国环境规划署将 2017 年世界环境日的主题确定为:人与自然,相联相生(Connecting People to Nature)。2017 年“六五”世界环境日中国主题为“绿水青山就是金山银山”,旨在动员引导社会各界牢固树立“绿水青山就是金山银山”的强烈意识,尊重自然、顺应自然、保护自然,自觉践行绿色生活,共同建设美丽中国。

(本刊编辑部供稿)