

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221213001

新型PEC柱-钢梁BRS耗能部分自复位组合框架 抗震试验研究

方有珍¹, 杨勇², 孙敏¹, 孙国华¹

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为进一步研究新型PEC柱-钢梁部分自复位连接组合框架抗震性能,考虑预拉杆长度和新型PEC柱脚连接方式,设计制作3榀新型PEC柱-钢梁BRS耗能部分自复位组合框架1:2缩尺试件并进行低周往复荷载试验。基于试验观察和实测数据整理,分析了试件滞回特性、抗侧刚度、自复位功效、耗能能力等抗震性能。研究表明:新型PEC柱-钢梁BRS耗能部分自复位连接组合框架可通过连接T形件长圆孔尺寸设计以实现“设计地震水平实现基本复位,大震设计水平下自复位连接转变为承压型传力模式实现部分复位”的性态化设计目标;在设计地震作用下,试件主要利用辅助BRS耗能件耗能,且残余侧移不超过自复位结构侧移限值(0.3%)要求,而在大震作用阶段,试件通过辅助BRS耗能元件耗能与结构主体构件损伤耗能相结合,承载能力呈增长趋势,且卸载后实现了部分复位功效;预拉杆设置有限长度可消除梁端拉压相消而小幅度提高了试件整体性,而新型PEC柱脚铰接明显削弱了结构整体性。

关键词: BRS耗能部分自复位连接; 新型PEC柱-钢梁组合框架; 自复位功效; 耗能能力; 低周往复荷载试验
中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0888-09

Experimental Study on Seismic Performance of a Novel PEC Column-steel Beam Composite Frame with Partial Self-centering BRS Energy-dissipating Connection

FANG Youzhen¹, YANG Yong², SUN Min¹, SUN Guohua¹

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To further investigate the seismic performance of a novel PEC column-steel beam composite frame with partial self-centering connections, the length of the pre-stressed bars and the connection type at the base of the novel PEC column were considered. Three 1:2 scale specimens of the PEC column-steel beam composite frame with partial self-centering BRS energy-dissipating connection were designed and fabricated, and low-cycle reverse loading tests were conducted. Based on test observations and measured data, the seismic performance of the specimens, including hysteretic characteristics, lateral stiffness, self-centering function, and energy dissipation capacity, was analyzed. The results showed that the PEC column-steel beam composite frame with partial self-centering BRS ener-

* 收稿日期:2022-12-13;修回日期:2023-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52178149、51478286),江苏省教育厅重大科研项目(18KJA560003)资助

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

gy-dissipating connection could achieve the performance-based design goal of "self-centering at the design-earthquake level, and partial self-centering at the maximum considered earthquake level due to the connection transitioning to a bearing-type connection" through the dimensional design of the long slotted holes in the T-shaped connector. Under the design earthquake level, the specimens primarily utilized BRS energy-dissipating components to dissipate energy, and the residual lateral drift did not exceed the self-centering limit (0.3%). At the maximum considered earthquake level, the specimens dissipated energy through a combination of the auxiliary BRS energy-dissipating elements and damage to the main structural components, demonstrating increasing bearing capacity while achieving partial self-centering function upon unloading. The limited length of the pre-stressed bars could eliminate the counteracting effects of tension and compression at the beam ends, slightly improving the overall integrity of the specimens. The hinged connection at the base of the new PEC column significantly weakened the structural integrity.

Keywords: partial self-centering BRS energy-dissipating connection; novel PEC column-steel beam composite frame; self-centering function; energy dissipation capacity; low-cycle reverse loading test

0 引言

我国处在一个地震多发区,建筑结构通过抗震设防三水准“小震不坏,中震可修,大震不倒”进行抗震设计。然而对于现有建筑物,一旦震后结构主体构件损伤严重导致其参与变形过大,则相应加大了修复难度和成本,为此,诞生了自复位结构(Self-Centering Structure,简称SC结构),即梁、柱或墙等连接部位通过设置预拉杆减小其震后残余变形,降低修复成本,且利用增设辅助耗能元件耗散地震能以发挥耗能减震作用。

迄今,国内外学者在自复位结构方面进行了系列研究。2012年P. M. Clayton等^[1]提出一种自复位框架内填钢板剪力墙体系,并对梁腹板厚度以及钢绞线初始预应力参数进行了试验研究,结果表明:腹板厚度影响其承载力和耗能,预应力加大可提高结构刚度和自复位能力。2014年吕西林等^[2]对可更换构件结构国内外研究最新进展进行了总结,指明了该领域的研究重点方向,且应重点研究可更换构件与连接部分的共同作用,力求可更换构件易于制造安装。2014年方有珍等^[3]为了有机协调结构复位功效、耗能能力和结构安全冗余度,提出了部分自复位连接设计思想,并进一步对新型PEC柱-钢梁BRS板部分自复位中节点的抗震性能进行了试验研究。2015年A. S. Tzimas等^[4]提出了在自复位结构梁的腹板处设置粘滞阻尼器的思路,研究显示:阻尼器能

提高结构的复位能力和抗倒塌能力。2016年T. Guo等^[5]对自定心混凝土框架进行了拟静力试验,结果证实:自复位混凝土框架节点连接区域破坏不明显,残余变形小。2016年D. M. Dowend等^[6]对采用不同节点构造的新型自复位剪力墙进行了非线性时程分析,结果表明:加载过程中,节点绕梁端翼缘处转动,自复位能力良好。2016年方有珍等^[7]对摩擦耗能部分自复位中节点进行了系列抗震试验研究,结果显示:层间侧移达到设计地震作用水平时,结构基本复位,当达到大震作用水平时,卸载后仍具有一定的复位功效。2019年谢剑等^[8]对复位钢筋混凝土剪力墙进行了抗震试验研究,结果显示:当位移角为1.94%时,常规剪力墙残余变形为自复位剪力墙的3倍,具有良好的自复位效果。2019年方有珍等^[9]对摩擦部分自复位层间框架层间子结构进行抗震可修复性试验,结果表明:通过简单修复后,即可实现受力发展进程、刚度退化规律、自复位功效和损伤耗能演化机理的基本恢复。2020年毕仲君等^[10]提出了一种摩擦耗能自复位支撑,并进行了系列试验研究和数值模拟,结果证实:支撑在RC框架合理设置能够有效控制框架整体残余位移。2020年L. J. Huang等^[11]对混凝土自复位梁柱节点进行了抗震试验研究,结果显示:通过合理的构造设计可使节点具有一定自复位功能和耗能能力。2021年方有珍等^[12]对采用有限长度预拉杆部分自复位组合框架结构层间抗震性能进行了试验研究,结果显示:设计地震水平下层间侧移限值1/50时,其整体与层间残余侧移均能满足自复

位结构要求,而在大震水平下层间侧移限值3.5%时,仍具有良好自复位功效。

综上所述,目前针对部分自复位结构抗震性能的研究主要集中在连接节点和层间子结构,而基于部分自复位结构层面的研究尚不完善。因此,本文采用文献[3,7]中部分自复位连接设计思想,考虑预拉杆长度和新型PEC柱柱脚连接方式,设计制作了3榀PEC柱-钢梁BRS耗能部分自复位连接组合框架1:2缩尺试件,并对其进行低周往复荷载试验,以揭示其抗震性能。

1 试验概况

以层高3.0 m的新型PEC柱-钢梁BRS耗能部分自复位组合框架为研究对象,选取底部两层结构

作为试件原型。

1.1 试件设计

基于实验室设备的加载能力,考虑预拉杆长度和新型PEC柱柱脚连接方式,设计制作了3榀1:2缩尺单跨两层半组合框架子结构试件,详见表1。柱、梁翼缘与腹板和混凝土材性实测指标见表2。

本文试件组装流程按照文献[9,12]进行,且通过测点应变片测试值以保证试件连接BRS耗能自复位连接脱开弯矩与BRS耗能对应弯矩比值 $M_a/M_b \approx 0.60$ (其中 $M_a = E_s \times \epsilon \times A \times h/2$, $M_b \approx E_s \times \epsilon \times A \times h/2 + A_{BRS} \times f_y \times h$, E_s 为钢材弹性模量, ϵ 为梁端应变测试值, A 为梁为截面面积, h 为截面高度, A_{BRS} 为BRS板面积, f_y 为BRS板屈服强度),组装完成试件如图1所示。

表1 设计参数

Table 1 Design parameters

| 试件编号 | 新型PEC柱 | 钢梁 | 连接件 | 连接件与柱连接 | 连接件与梁连接 | 预拉杆 | 柱脚连接方式 |
|--------------|---------------------------|-----------|--------------|-------------|-----------|------------------|--------|
| SC-CPEC-BF | 卷边PEC: Q235 混凝土:C25 | I25a;Q345 | BRS耗能T形件Q235 | 8.8级M20对穿螺栓 | 8.8级M18螺栓 | 通长10.9级M20高强螺栓 | 固结 |
| SC-CPEC-BLF | | | | | | 有限长度10.9级M20高强螺栓 | |
| SC-CPECJ-BLF | | | | | | | 铰接 |

表2 实测材性

Table 2 Measured material properties

| 新型PEC截面钢筋(Q235) | | 混凝土 实测强度/ (N·mm ⁻²) | I25a工字梁(Q345) | |
|--------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 截面组成 | 实测指标 | | 翼缘 | 腹板 |
| 翼缘:2-310×5 腹板:1-240×5 | 强度 | 32.2 | 强度 | 强度 |
| | $f_y=287$ | | $f_y=381$ | $f_y=372$ |
| | $f_u=415$ | | $f_u=532$ | $f_u=516$ |
| | 弹模 | | 弹模 | 弹模 |
| | $E=2.01$ | | $E=2.00$ | $E=2.02$ |
| | 伸长率 | | 伸长率 | 伸长率 |
| | $\delta=22.6\%$ | | $\delta=20.3\%$ | $\delta=19.4\%$ |

注:表中未标注强度单位为N/mm²;弹性模量单位为10⁵MPa

1.2 试验方案

1.2.1 加载辅助设施与测点布置

试件顶部半层柱的柱顶通过平面铰支座与加载梁连接,新型PEC柱脚与地梁刚接或铰接,而地梁通过压梁与千斤顶进行限位;加载梁侧设置平面

外支撑以确保其平面内受力,如图2所示。

为了保证试验研究目标,测点布置包括:(1)楼层处水平位移传感器(WB1~WB4);(2)自复位连接转角位移传感器(WB5~DT12);(3)新型PEC柱与钢梁关键截面应变片或应变花,如图2所示。

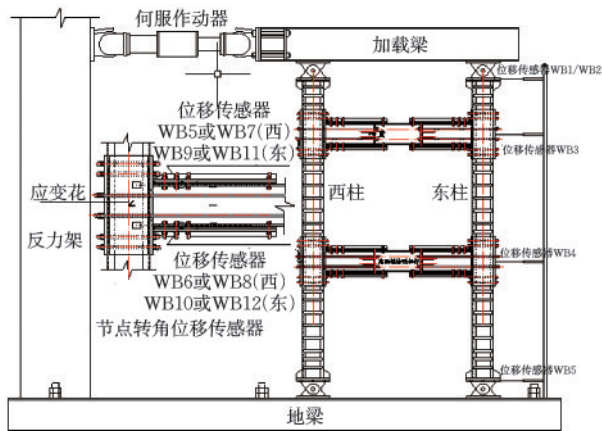


图2 测点布置

Fig.2 Arrangement of measurement points

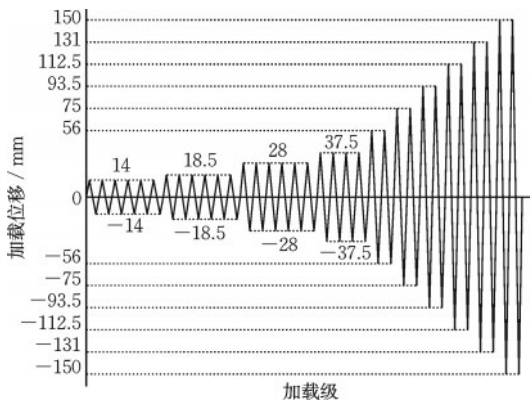


图3 试验加载制度

Fig.3 Test loading protocol

2 试验现象描述

试验加载过程中,所有试件力学发展进程基本相同:加载开始阶段,梁端由于预拉杆预应力使其处在消压状态,BRS耗能 T形件与梁端接触面紧密接触未脱开;加载侧移到0.75%级时,梁端消压已完成,BRS耗能 T形件与梁端受拉侧接触面脱开,见图4(a),但卸载后预拉杆预拉力使得节点连接脱开部位自行回位而实现了完全复位;相继加载侧移至2.0%级过程中,BRS耗能 T形件与梁端受拉侧接触面明显脱开,且BRS耗能 T形件与钢梁和盖板之间产生明显的错动,见图4(b),但卸载后脱开部位仍能闭合,基本实现了复位(图4(c))。加载侧移到2%时,梁端受拉侧BRS耗能 T形件长圆孔壁与螺栓杆开始接触承压,连接从自复位转化为承压型传力模式,卸载后试件残余侧移超过自复位残余侧移限值而进入部分自复位阶段;继续加载,所有试

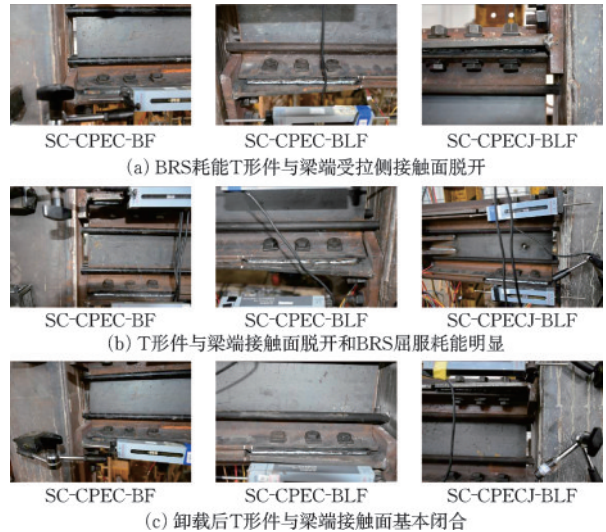


图4 试验过程关键点现象

Fig.4 Key phenomena during test process

件承载力仍呈增大趋势,节点连接梁端受压翼缘局部相继屈服并不断发展,预拉杆预应力损失不断增加,卸载后残余变形增大显著,复位功效显著降低;加载侧移4.0%时,试件整体与层间实测侧移均超过大震作用水平框架结构侧移限值1/30,考虑试验加载现场安全性,则试验加载结束。

3 试验结果分析

3.1 滞回特性

为系统研究预拉杆长度和新型PEC柱脚连接方式对新型PEC柱-钢梁BRS耗能部分自复位连接组合框架抗震机理的影响规律,本文对试验实测数据进行整理,得到了试件整体与层间的水平荷载-实测侧移滞回曲线,如图5所示。

对图5进行对比分析发现:① 加载开始阶段,所有试件的自复位节点连接预拉杆预应力使梁端处于消压状态,滞回环面积小;② 加载至侧移0.75%级时,自复位连接梁端受拉侧消压完成,BRS耗能 T形件与梁端受拉侧接触面脱开,BRS耗能 T形件开始屈服耗能,试件 SC-CPEC-BF、SC-CPEC-BLF 和 SC-CPECJ-BLF 对应承载力分别为 88.6 kN(推)/70.6 kN(拉)、93.8 kN(推)/80.2 kN(拉)和 59.2 kN(推)/51.6 kN(拉),即预拉杆采用部分长度可提高了试件整体性,柱脚铰接削弱试件整体性明显,但所有试件BRS耗能部分自复位连接卸载后脱开部位再次闭合,结构基本复位;

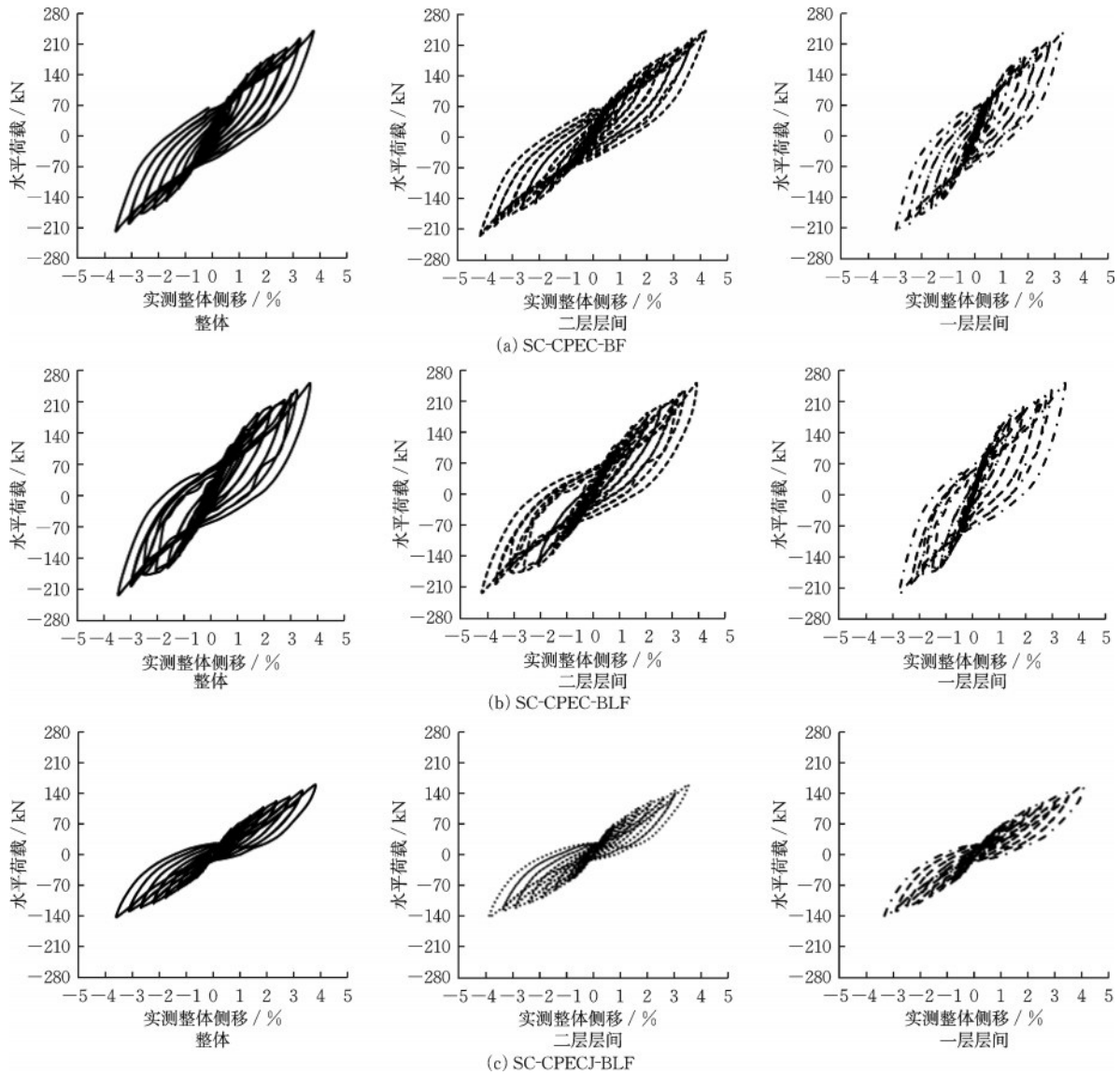


图5 水平荷载—实测侧移滞回曲线

Fig 5 Hysteresis loops of horizontal load and measured lateral drift

③ 随后加载侧移至2.0%级过程中, BRS耗能T形件与梁和盖板明显错位, 即BRS耗能T形件屈服耗能继续发展, 滞回面积进一步加大, 但卸载后试件自复位连接脱开部位仍实现较好闭合; ④ 加载侧移至2.0级, 所有试件梁端受拉侧BRS耗能T形件上长圆孔壁与螺栓杆开始接触挤压, 连接转变为承压型连接; ⑤ 继续加载, 所有试件BRS耗能T形件与梁端脱开发展较慢, 梁端受压侧翼缘局部受压屈服并发展, 预拉杆预应力损失不断加大, 滞回环形状趋于饱满, 试件自复位功效降低显著; ⑥ 加载至侧移4.0%时, 所有试件承载力仍呈继续增大, 试件SC-CPEC-BF、SC-CPEC-BLF和SC-CPECJ-ML的承载力分别达到239.4 kN(推)/218.4 kN(拉)、

248.3 kN(推)/220.5 kN(拉)和159.5 kN(推)/140.4 kN(拉), 此时对应试件实测整体侧移为3.77%(推)/3.57%(拉)、3.72%(推)/3.48%(拉)和3.82%(推)/3.60%(拉), 所有试件均已转化为承压型连接传力模式, 其中试件SC-CPEC-BF和SC-CPEC-BLF承载力变化基本相同, 且所有试件均超过大震作用水平下框架结构侧移限值1/30要求, 则试验终止。

3.2 抗侧刚度

随着加载级别的增大和循环次数的增加, 试件耗能损伤进程加剧, 其刚度不断降低。本文抗侧刚度采用峰值抗侧刚度 K_p 加以表征, 即加载滞回环侧

移峰值点连线斜率,见式(1):

$$K_{pi} = \frac{|P_i^+| + |P_i^-|}{|\Delta_i^+| + |\Delta_i^-|} \quad (1)$$

式中, Δ_i^+ 、 Δ_i^- 为加载级循环推拉方向峰值侧移; P_i^+ 、 P_i^- 为峰值侧移 Δ_i^+ 、 Δ_i^- 对应承载力。

根据滞回曲线进行计算,得到了所有试件的整体与层间抗侧刚度退化规律,如图6所示。

从图6对比可以看出:加载初期,试件 SC-CPEC-BF 整体、二层和一层初始抗侧刚度分别为 5.44×10^3 kN/m、 8.71×10^3 kN/m 和 14.35×10^3 kN/m,试件 SC-CPEC-BLF 整体、二层和一层初始抗侧刚度分别为 5.83×10^3 kN/m、 9.45×10^3 kN/m 和 15.20×10^3 kN/m,试件 SC-CPECJ-BLF 整体、二层和一层初始抗侧刚度分别为 3.29×10^3 kN/m、 6.57×10^3 kN/m 和 6.58×10^3 kN/m,即预拉杆有限长度设置使得梁端变形相对独立,从而消除梁端相互影响,相应提高试件整体性,新型 PEC 柱脚刚接试件各层间抗侧刚

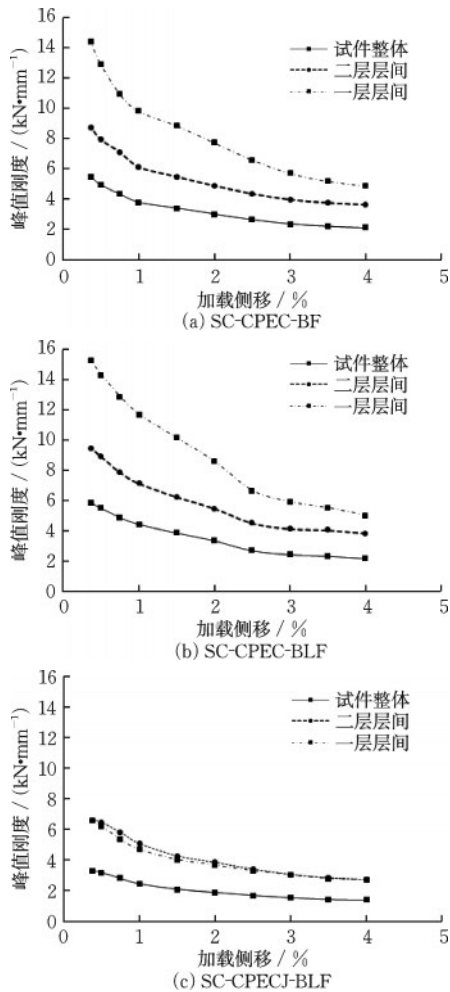


图6 抗侧刚度退化曲线

Fig.6 Lateral stiffness degradation curves

度差异明显,而柱脚铰接试件各层间抗侧刚度基本相同;继续加载侧移至1.0%级过程中,梁端消压完成,BRS耗能T形件与梁端受拉侧接触面相继出现脱开,试件抗侧刚度下降趋势显著;随后加载侧移至2.0%级过程中,BRS耗能T形件与梁端受拉侧接触面脱开加大,且BRS耗能T形件与钢梁和盖板错动明显,BRS耗能T形件屈服耗能,试件抗侧刚度下降趋势减小;随后继续加载至试验结束,试件自复位连接转变为承压型传力模式,试件主体构件梁发挥传力作用,抗侧刚度下降趋势趋于平缓。

3.3 自复位能力

自复位结构性能优势在于通过自复位连接以实现震后残余变形较小,且结构主体构件基本无损伤,建筑使用功能快速恢复,修复成本低。

试件的自复位功效主要通过残余侧移体现,为此,本文根据试件滞回曲线得到了所有试件整体与层间残余侧移,如图7所示。

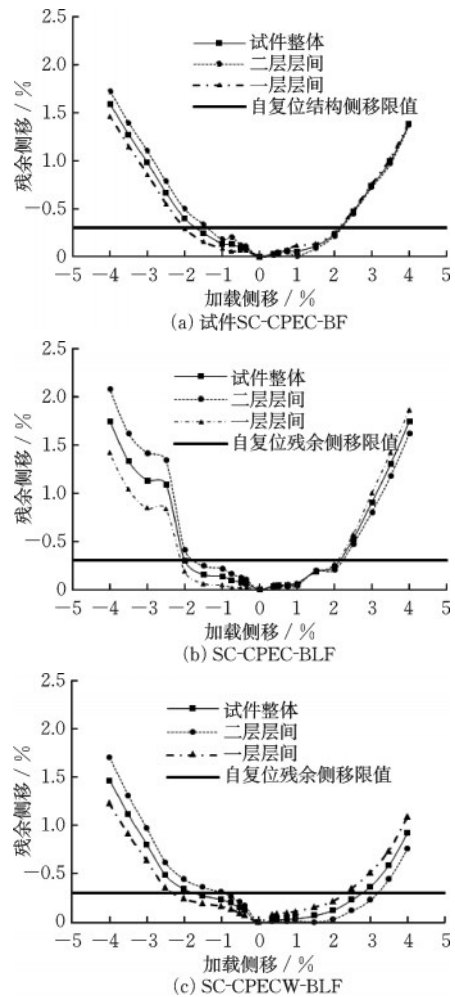


图7 残余侧移

Fig.7 Residual lateral drift

通过图7可知:①加载侧移至0.75%级,梁端消压完成,T形件与梁端受拉侧翼缘接触面脱开,卸载后试件件SC-CPEC-BF整体、二层和一层残余侧移分别达到0.06%(推)/0.13%(拉)、0.05%(推)/0.20%(拉)和0.07%(推)/0.05%(拉),试件SC-CPEC-BLF整体、二层和一层残余侧移分别为0.04(推)/0.09(拉)、0.03%(推)/0.16%(拉)和0.06%(推)/0.02%(拉),试件SC-SPECJ-BLF整体、二层和一层残余侧移分别为0.04%(推)/0.20%(拉)、0.10%(推)/0.13%(拉)和0.02%(推)/0.27%(拉),整体与层间残余侧移较小,均不超过自复位残余侧移要求,实现了自复位功效;②加载侧移至2%过程中,试件摩T形件BRS板开始屈服耗能并不断发展,残余侧移增大趋势明显,但卸载后脱开部位再次闭合,具有良好的复位功效;③加载侧移至2.0%级,梁端受拉侧T形件上长圆孔壁与螺栓杆开始接触,连接转变为承压型传力模式,卸载后试件SC-CPEC-BF整体、二层和一层残余侧移分别为0.23%(推)/0.39%(拉)、0.22%(推)/0.50%(拉)和0.25%(推)/0.29%(拉),试件SC-CPEC-BLF整体、二层和一层残余侧移分别为0.23(推)/0.30(拉)、0.21%(推)/0.42%(拉)和0.26%(推)/0.19%(拉),试件SC-SPECJ-BLF整体、二层和一层残余侧移分别为0.13%(推)/0.35%(拉)、0.22%(推)/0.24%(拉)和0.04%(推)/0.45%(拉),即残余侧移超过自复位残余侧移限值(0.3%)要求,进入部分自复位阶段;④继而需加载至试验结束,梁端受压翼缘相继局部受压屈服且不断向周边拓展,试件整体与层间残余侧移增大趋势显著,但卸载后仍具有部分自复位功能。

3.4 滞回耗能

试件滞回环面积即为其滞回耗能。滞回环面积增大,其滞回耗能增加,结构耗能减震能力越大。本文根据滞回曲线对滞回耗能(每个加载级取所含滞回环面积平均值)进行计算,得到了试件整体与层间滞回耗能发展曲线,如图8所示。

通过图8对比分析显示:①加载侧移至0.75%时,所有试件梁端均处于消压状态,其耗能甚微;②加载侧移至1.0%开始,试件梁端消压完成,T形件BRS板开始屈服耗能,耗能明显增大;③继续加载侧移至2.0%后,受拉侧梁端T形件长圆孔壁与螺栓杆接触,连接转化为承压型连接,梁端受压侧翼

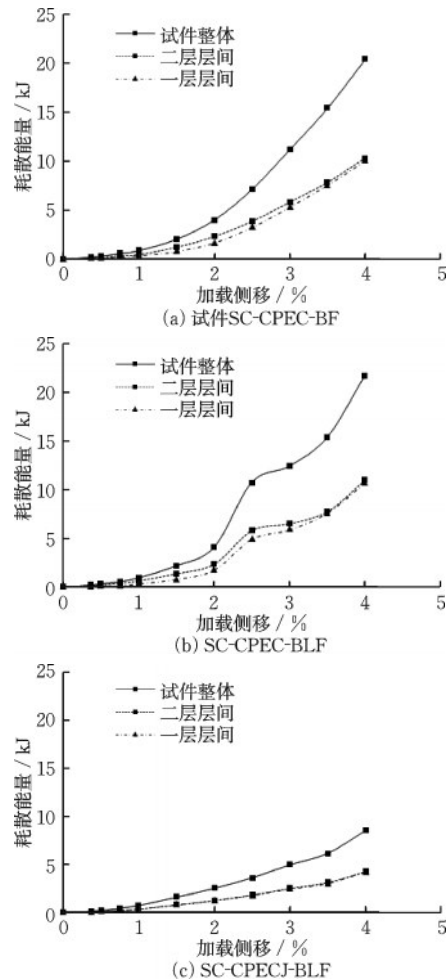


图8 试件滞回耗能

Fig 8 Hysteretic energy dissipation of specimens

缘局部受压屈服并不断发展,滞回耗能显著增大;④所有试件一二层滞回耗能基本相等,即试件耗能分布均匀;⑤有限长度预拉杆增强了试件的整体性,结构耗能性能发挥较好,新型PEC柱脚铰接显著减弱了试件结构的整体性,其滞回耗能能力发展延缓,耗能减小。

4 结论

通过3榀新型PEC柱-钢梁BRS耗能部分自复位连接框架试件的抗震试验分析,得出了以下结论:

(1) T形件长圆孔尺寸合理取值可实现“设计地震水平阶段基本复位,大震设计水平阶段自复位连接转变为承压型连接以部分复位”的性态化设计。

(2) 在不超设计地震水平相应框架侧移限值

(2.0%)时,试件整体与层间残余侧移均不超过自复位侧移限值(0.3%)要求,而在大震作用阶段,连接转变为承压型,试件承载能力仍呈增长趋势,且卸载后仍实现了部分复位功效。

(3) 有限长度预拉杆一定幅度提高了试件整体性,而新型PEC柱脚采用铰接显著削弱了试件整体性。

(4) 设计地震阶段,试件主要利用辅助BRS进行耗能,而大震作用阶段,试件则通过辅助耗能件BRS耗能与结构构件损伤耗能相结合。

参考文献:

- [1] Clayton P M, Winkley T B, Berman J W, et al. Experimental investigation of self-centering steel plate shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(7): 952-960.
- [2] 吕西林,陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 27-36.
Lyu X L, Chen C. Research progress in structural systems with replaceable members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 27-36. (in Chinese)
- [3] 方有珍,杨永龙,陈赟,等. 新型PEC柱-钢梁BRS板部分自复位节点的抗震性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 598-603.
Fang Y Z, Yang Y L, Chen Y, et al. Seismic performance of novel PEC column-steel beam interior joint with partial post-tensioned BRS energy-dissipation connection [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2014, 36(5): 598-603. (in Chinese)
- [4] Tzimas A S, Dimopoulou A I, Karavasilis T L. EC8-based seismic design and assessment of self-centering post-tensioned steel frames with viscous dampers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 105: 60-73.
- [5] Guo T, Song L, Cao Z, et al. Large-scale tests on cyclic behavior of self-centering prestressed concrete frames [J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(6): 1263-1274.
- [6] Dowden D M, Clayton P M, Li C, et al. Full-scale testing of self-centering steel plate shear wall [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(1): 4-15.
- [7] 方有珍,赵凯,陈赟,等. 新型卷边PEC柱-钢梁摩擦耗能型部分自复位连接中节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 22-30.
Fang Y Z, Zhao K, Chen Y, et al. Experimental study on seismic performance of new crimping PEC column-steel beam interior joint with post-tensioned friction damped connection [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(4): 22-30. (in Chinese)
- [8] 谢剑,孙文笑,徐福泉,等. 钢筋混凝土自复位剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 108-116.
Xie J, Sun W X, Xu F Q, et al. Experimental study on seismic behavior of self-centering RC shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 108-116. (in Chinese)
- [9] 方有珍,季云,陈军,等. 摩擦部分自复位连接组合框架层间抗震修复性试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(6): 60-67.
Fang Y Z, Ji Y, Chen J, et al. Research on the anti-seismic resilience of inter-story substructure of partial encased concrete composite column-steel beam frame with partial self-centering friction damped connection [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(6): 60-67. (in Chinese)
- [10] 毕仲君,胡志强,王琪,等. 基于新型自复位摩擦耗能支撑的RC框架结构地震残余变形控制[J]. 振动与冲击, 2020, 39(15): 95-102.
Bi Z J, Hu Z Q, Wang Q, et al. Seismic residual deformation control for RC frame structures based on a novel self-centering friction damping brace [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(15): 95-102. (in Chinese)
- [11] Huang L J, Zhen Z. Experimental investigation of friction-damped self-centering prestressed concrete beam-column connections with hidden corbels [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(3): 1-15.
- [12] 方有珍,黄志豪,张志成,等. 有限长度预拉杆部分自复位PEC柱组合框架中间层抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 61-68, 102.
Fang Y Z, Huang Z H, Zhang Z C, et al. Experimental study on seismic performance of inter-story substructure of PEC column-steel beam frame with limited length pretension bar-partial self-centering connection [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 61-68, 102. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)