

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201601210

摩擦耗能部分自复位连接组合框架边节点抗震性能试验研究

方有珍, 马雪玉, 耿苏齐, 金 晶, 汪逸萍

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘 要:为进一步研究摩擦耗能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,考虑PEC柱布置方式和柱顶竖向力2个设计参数设计制作3个缩尺试件并进行了拟静力下抗震性能试验研究。根据试验测试结果,对试件承载力、节点转动刚度、残余侧移角、滞回耗能和节点受力机理等方面进行了分析。研究表明:摩擦耗能部分自复位连接可通过摩擦板摩擦滑移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体构件梁柱处在弹性状态;PEC柱顶竖向力明显提高了其初始抗弯刚度,而其二阶效应加快了连接的耗能发展进程,且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;试件SMJ-2加载至试验结束对应层间相对侧移3.182%,其残余侧移角小于0.005 rad,即具有极佳的自复位功效,试件SMJ-3加载至中震层间相对侧移限值1/50和大震层间相对侧移限值1/30,其残余侧移角分别小于0.005和0.01 rad,自复位功效良好,而试件SMJ-1在加载至中震层间侧移限值1/50,其残余侧移角小于0.01 rad,但随后加载产生的残余侧移角由于竖向力二阶效应而增大趋势明显,自复位功效相应减弱。

关键词:摩擦耗能部分自复位连接; PEC柱组合框架边节点; 自复位功效; 耗能能力; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)03-0076-09

Experimental Investigation on Seismic Performance of Exterior Joint with Partial Self-centering Friction Damped Connection in Composite Frame

FANG Youzhen, MA Xueyu, GENG Suqi, JIN Jing, WANG Yiping

(School of Civil Eng., Suzhou Univ. of Sci. and Technol., Suzhou 215011, China)

Abstract: To further investigate the seismic performance of the exterior joint with partial self-centering friction damped connection in innovative PEC column-steel beam composite frame, axial compression of PEC column and its layout was taken into consideration to design three 1:1.6 scale specimens and then tests were conducted under quasi-static cyclic lateral loading. Based on test measurements and observation, the specimens' seismic performances were studied, including the load-carrying capacity, bending stiffness degradation, residual drift angle, hysteretic energy-dissipation and load-carrying mechanism of joint. The results showed that post-tensioned bars provided restoring force to realize self-centering function and friction energy-dissipation plates can provide energy dissipation capacity to reduce the structural earthquake response. Axial compression of PEC column increased the initial bending stiffness but its second effect accelerated the energy-dissipation developing process, while the layout of PEC column had little effect on initial flexural stiffness and developing process of flexural stiffness degradation and energy-dissipation. The specimen SMJ-2 exhibited superior self-centering function as its residual drift angle was less than 0.005 rad when test end with the loading drift 3.18%, the specimen SMJ-3 owned sound self-centering function as its residual drift angle was less than 0.005 rad when the loading drift approximately equaled to the inter-story drift limit (1/50) at design based earthquake level and 0.01 rad when the loading drift surpassed the inter-story drift limit (1/30) at maximum considered earthquake level, while the residual drift angle of specimen SMJ-1 was less than 0.01 rad when loading to the inter-story drift limit (1/50) at design based earthquake level, but it was increased with the second-effect of axial compression of PEC column, which led to the decay of its self-centering function.

收稿日期:2016-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078247; 51478286); 江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人资助项目(2014); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才计划资助项目(2016)

作者简介:方有珍(1972—),男,教授,博士。研究方向:钢结构、钢-混凝土组合结构抗震性能。E-mail: fyz72@mail.usts.edu.cn

Key words: partial self-centering friction damped connection; exterior joint in composite frame; self-centering function; energy-dissipation capacity; quasi-static cyclic lateral loading tests; seismic performance

一般建筑物在遭遇地震后,一旦出现明显的残余变形或主要受力构件遭受严重破坏,将明显加大震后修复难度和修复成本,甚至导致其使用功能不满足而失去了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,为此成为了目前结构工程抗震领域的研究热点。

迄今为止,国外学者在自复位结构性能研究方面成果丰富,而国内还处在初步研究阶段,成果相应匮乏。2005年Rojas等^[1]对采用预应力摩擦耗能连接(PEDC)的6层自复位钢框架和焊接抗弯钢框架(WMRF)在8条记录地震波下的抗震性能进行了数值模拟,结果显示:自复位钢框架与焊接抗弯钢框架层间侧移峰值接近,而在设计地震(DBE)水平和罕遇地震(MCE)水平,其残余侧移值分别为焊接抗弯钢框架的23%和20%;2008年Kim^[2]研发出采用硬质钢材与非石棉有机破碎垫片作为摩擦面的新型摩擦耗能自复位连接形式,进一步研究得出:其极限承载能力、抗弯刚度和抗震延性均优于常规焊接连接;2009年Iyama等^[3]对梁顶/底翼缘采用摩擦耗能元件和仅在梁底翼缘采用摩擦耗能元件的预应力连接6层自复位框架在记录地震波下的抗震性能进行了分析,结果显示:采用非对称摩擦阻尼耗能元件自复位连接增大了梁截面面积和提高了建造成本;2009年Lin等^[4]进一步提出了在梁腹板部位设置摩擦耗能元件(WFD)的摩擦耗能自复位连接方式,由预应力钢绞线和WFD共同提供连接的抗弯能力,随后针对洛杉矶坚硬地基上建成的1栋7跨4层增设WFD自复位实体结构,利哈伊大学采用混合模拟方法对一个0.6比例缩尺两跨自复位抗弯钢框架模型试验进行了数值模拟以研究其余部分的影响,结果表明:采用WFD耗能元件试件较好实现了“自复位能力、设计地震(DBE)下无损伤和罕遇地震(MCE)下轻微损伤”的预定性态设计目标。

然而,既有自复位结构要求保证主体结构构件处于弹性状态,这势必造成了结构过大的安全冗余度和较高的建造成本,相应限制了其应用,为此,2014年方有珍等^[5-6]对现有自复位连接进行改进,基

于自复位功能、耗能能力和结构安全冗余度之间有机协调,提出了在梁柱节点区梁有限长度区段设置预拉杆和辅助耗能元件的部分自复位连接形式,并对采用摩擦耗能部分自复位连接PEC组合柱(partially encased concrete composite column,简称PEC组合柱)-钢梁中节点进行了试验研究与数值模拟,研究表明:节点连接转角达到中震层间相对侧移限值1/50前,残余转角均小于0.005 rad,随后摩擦板长圆孔壁与高强螺栓接触挤压,连接转化为承压型受力模式,即便超过大震层间相对侧移限值1/30,其卸载残余转角仍不大于0.01 rad,有效实现了“自复位功效、耗能能力和安全冗余度有机统一”的设计目标。

作者基于自身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柱竖向力两个参数,设计制作3个1:1.6缩尺摩擦耗能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拟静力水平往复荷载下的抗震性能试验研究,以揭示其抗震机理。

1 摩擦部分自复位连接设计方法

摩擦耗能部分自复位连接设计理念参照文献[5-6],其弯矩-转角曲线如图1。

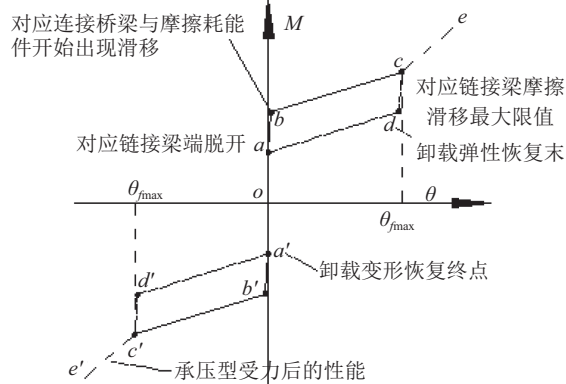


图1 摩擦部分自复位连接弯矩 M -转角 θ 曲线

Fig.1 M - θ curve of partial self-centering friction damped connection

基于摩擦部分自复位连接设计理念,假定梁在受力过程中绕梁端翼缘与摩擦T形件接触面外边缘交接点转动,则节点连接受力机理见图2。

摩擦耗能部分自复位连接边节点计算公式:

$$N_{ct} = N_{cb} + V_b \quad (1)$$

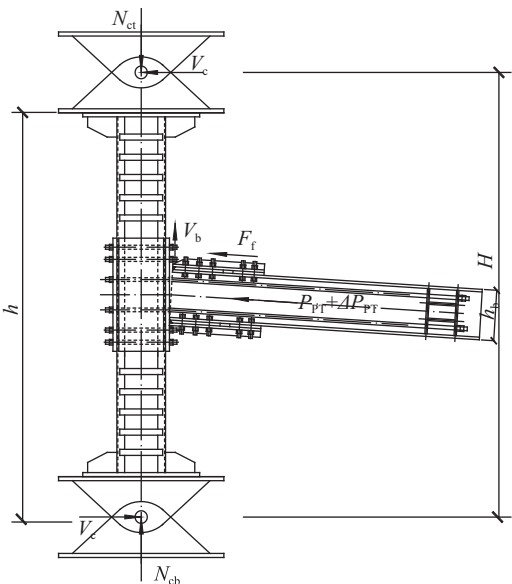


图 2 摩擦部分自复位连接受力机理

Fig.2 Load-carrying mechanism of partial self-centering friction damped connection

$$V_b = (V_t \times H + N_{ct} \times \Delta) / L_{梁} \quad (2)$$

$$M_a = P_{PT} \times h_b / 2 \quad (3)$$

$$M_b = (P_{PT} + \Delta P_{PT}) \times \frac{h_b}{2} + F_f \times h_b \quad (4)$$

式中, N_{ct} 、 N_{cb} 分别为PEC柱顶底竖向力, V_c 为PEC柱顶水平力, V_b 为钢梁剪力, H 为PEC柱顶底平面铰支座中心距离, Δ 为PEC柱顶底相对水平位移, $L_{梁}$ 为梁端平面铰支座到节点区中心水平距离, M_a 为梁端受拉部位与摩擦T形件接触面完成消压对应的弯矩, M_b 为梁端受拉侧T形件与梁翼缘接触面开始产生摩擦滑动时对应的弯矩, P_{PT} 近似为预拉杆预拉力, ΔP_{PT} 为梁端受拉部位与摩擦T形件接触面脱开至对应计算时刻的预拉杆应力增量, h_b 为梁高, F_f 为T形件与盖板和梁翼缘摩擦力, E_{PT} 为预拉杆的弹性模量, A_{PT} 为预拉杆的总面积, Δl 为梁端受拉部位与摩擦

T形件接触面脱开至对应计算时刻的预拉杆弹性伸长量, l 为预拉杆受力段长度。

2 试验概况

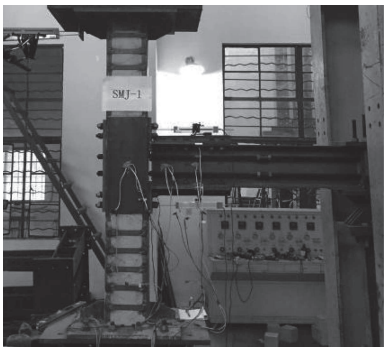
选取层高3.6 m的新型PEC柱-钢梁组合框架中层边节点作为研究对象, 截取与节点相连的上下柱与梁反弯点间(中层柱反弯点取柱中间截面处, 梁反弯点取距端部1/4跨截面处)子结构为试件原型。

2.1 试件设计

考虑PEC柱顶竖向力和PEC柱钢构架截面布置方式2个设计参数, 并结合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个摩擦耗能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。卷边PEC柱钢构架采用Q235B钢板(翼缘为310 mm×5 mm钢板且端部卷边30 mm, 腹板240 mm×5 mm钢板)焊接组合截面, 混凝土为C25; 钢梁选用Q345工字钢I25a; 摩擦T形件采用Q235B钢板焊接; 加强盖板利用Q345工字钢I25a剖分而成; 摩擦T形件与PEC柱采用8.8级M20对穿螺栓连接, 而与梁翼缘和加强盖板采用8.8级M18螺栓连接(预紧力设计值取50 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; SMJ-1和SMJ-2为PEC柱强轴与钢梁连接, SMJ-3为PEC柱弱轴与钢梁连接, 实体试件见图3。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), 实测立方体抗压强度平均值 $f_{cu, m}$ =28.12 MPa。

表 1 试件材性实测指标

Tab.1 Material property Index of specimens				
材性	f_y /MPa	f_u /MPa	E /MPa	δ /%
PEC钢板(Q235) 翼缘与腹板	294	414	2.01×10^5	22.80
摩擦板(Q235)	297.4	450.8	2.13×10^5	23.03
钢梁I25a (Q345) 翼缘与腹板	425.1	603.4	2.27×10^5	21.30



(a) 试件SMJ-1



(b) 试件SMJ-2



(c) 试件SMJ-3

图 3 试验试件

Fig.3 Test specimens

2.2 试验方案

2.2.1 测试仪表布置

为了获取用于研究采用摩擦耗能部分自复位连接的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4。位移计DT1、DT2与DT7测量PEC柱顶底侧移量;梁翼缘布置位移计测量节点连接转动变形,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;应变片(1、2和3)测量节点区剪切变形,应变片(4、5和6)测量梁端剪切变形,而应变片7、8和9用于判别内排螺栓端部梁截面的受力状态。

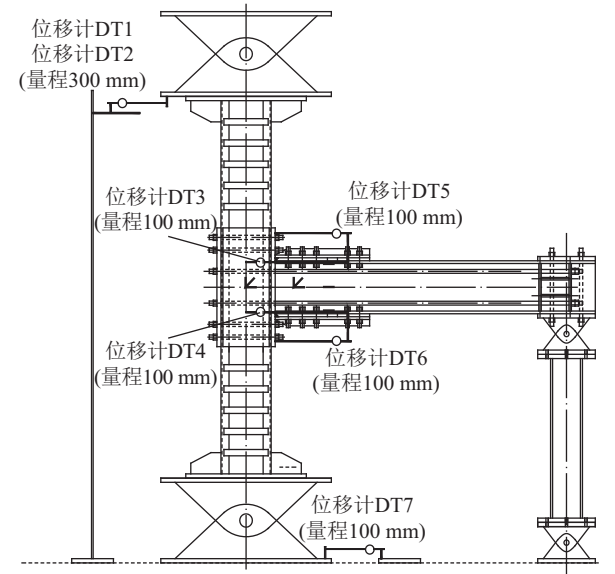


图4 测试仪表布置

Fig.4 Arrangement of measuring instruments

2.2.2 加载方案与加载制度

为了准确反映试件边界条件,课题组专门设计了4个平面铰支座以实现试件边界条件与实际受力状况基本吻合,试验在江苏省结构工程重点实验室四连杆加载架上通过液压伺服系统对PEC柱顶进行水平位移循环往复加载,加载方案见图5。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SMJ-1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,其余试件均直接实施水平加载,水平加载制度考虑到实际地震的特点(小震频遇,大震罕遇),参照文献[7]选取,见表2(其中,第9级后的每级按照加载侧移10 mm递增)。

3 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(至水平侧移20 mm级之前),对穿螺栓与预拉杆的预应力使得摩擦T形件与PEC柱、钢梁端部接触面均处在消压状态,接触面接触紧密,且试件



图5 试验加载方案

Fig.5 Loading scheme for tests

表2 试验加载制度

Tab.2 Loading protocol for tests

加载级	加载位移 Δ/mm	相对侧移 $\delta/\%$	循环次数
1	7.5	0.341	6
2	10	0.455	6
3	15	0.682	6
4	20	0.909	4
5	30	1.364	2
6	40	1.818	2
7	50	2.273	2
8	60	2.727	2
9	70	3.182	2

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

组成元件均处在弹性状态,见图6(a);继续加载至水平侧移20 mm级,摩擦T形件与钢梁端部受拉部位接触面完成消压,接触面脱开,见图6(b);随着加载的继续,梁端受拉部位摩擦T形件开始产生摩擦滑移并不断发展,梁端受拉部位与摩擦T形件脱开现象随之加剧,而卸载至零时,各试件连接出现不同程度的残余变形,见图6(c)与(d)。其中试件SMJ-2加载至水平侧移70 mm级由于预拉杆套筒连接部位松动而试验终止,而试件SMJ-1和SMJ-3均加载至超过大震层间相对侧移限值1/30 ~ 1/20对应的水平侧移100 mm级,试验才宣告结束。

4 试验结果分析

4.1 试件滞回曲线

为了研究摩擦耗能部分自复位连接的新型卷边

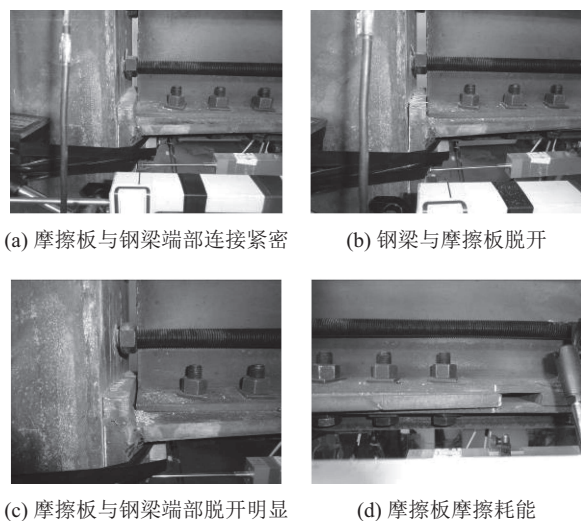


图 6 试验观测

Fig.6 Inspection of the tests

PEC柱-钢梁边节点的抗震性能,根据试验测试数据整理,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。

4.1.1 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 $M=P \times H+N_{\text{总}} \times \Delta_1$, 实测相对侧移角 $\theta=\Delta_1/h$, 其中, P 为 PEC 柱顶水平荷载, $N_{\text{总}}$ 为 PEC 柱顶加载梁自重 $G(70 \text{ kN})$ + 竖向力 N , Δ_1 为位移计 DT2 与 DT7 实测数据之差, H 为试件 PEC 柱上下支座转轴间距离, h 为 PEC 柱下部铰支座转轴中心到柱顶端板间距离 (见图 2)。通过试验数据得到的梁端弯矩 M -实测相对侧移角 θ 滞回曲线见图 7。

从图 7 中可知: 试件 SMJ-1 位移加载至相对侧移 4.546% 级的第 1 个循环时, 推拉方向最大实测相对侧移角分别为 0.039 9 和 -0.041 4 rad, 对应最大承载力分别为 220.27 和 -278.66 kN·m; 试件 SMJ-2 位移加载至相对侧移 3.182% 级的第 1 个循环时, 推拉方向最大实测相对侧移角分别为 0.027 3 和 -0.028 8 rad, 对应最大承载力分别为 134.28 和 -120.85 kN·m; 试件 SMJ-3 位移加载至相对侧移 4.546% 级的第 1 个循环时, 推拉方向最大实测相对侧移角分别为 0.0411 和 -0.042 2 rad, 对应最大承载力分别为 163.92 和 -146.21 kN·m。对图进一步分析可知: 1) 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弹性变形, 试件整体完好; 2) 试件 SMJ-1 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 2 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; 3) 试件 SMJ-2 由于 PEC 柱强轴与钢梁连接能更好满足“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; 4) 试件 SMJ-3 柱由

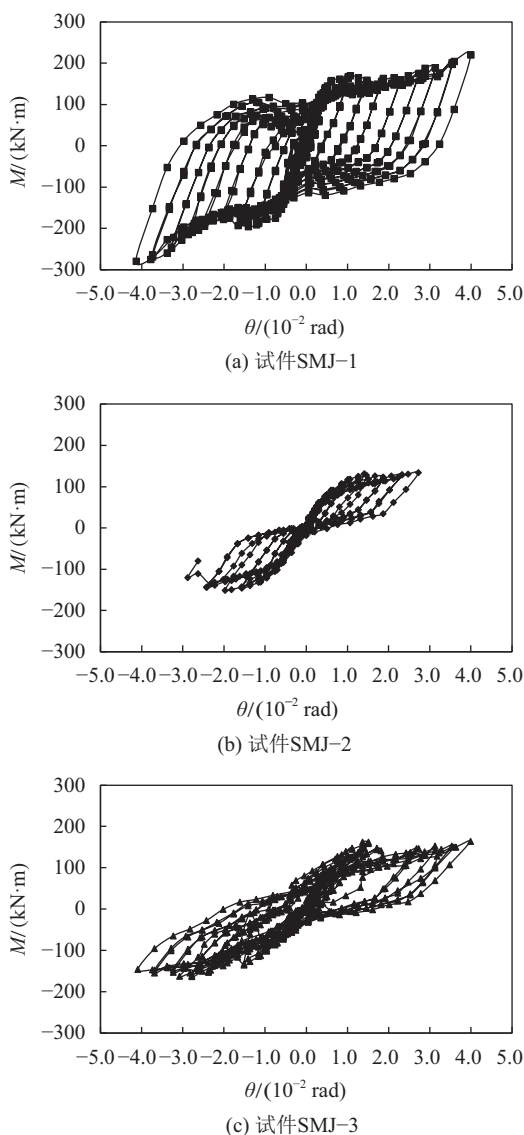
图 7 梁端弯矩 M -实测相对侧移角 θ 滞回曲线

Fig.7 Hysteretic loops of beam-end moment-drift angle 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。

4.1.2 梁端弯矩-节点连接转角滞回曲线

框架结构梁柱节点连接性能是其整体性能的关键部位, 为此本文对位移计 DT3 与 DT4 实测数据进一步整理 (节点连接转角 $\theta=\Delta_2/h'$, 其中 Δ_2 为位移计 DT4 与 DT3 实测数据之差; h' 为位移计 DT3 与 DT4 之间距离), 得到了试件梁端弯矩 M -节点连接转角 θ_1 的滞回曲线, 见图 8。

对图 8 进行对比分析发现, 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, 梁端与摩擦 T 形件接触面

脱开,随即摩擦T形件与钢梁接触面出现摩擦滑移,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,摩擦T形件摩擦滑移不断加剧,梁端与摩擦T形件接触面脱开明显,且卸载后预拉杆自复位功效出现不同程度的退化,连接残余转角相应增大,其中,试件SMJ-2退化最慢,而试件SMJ-1最为明显。

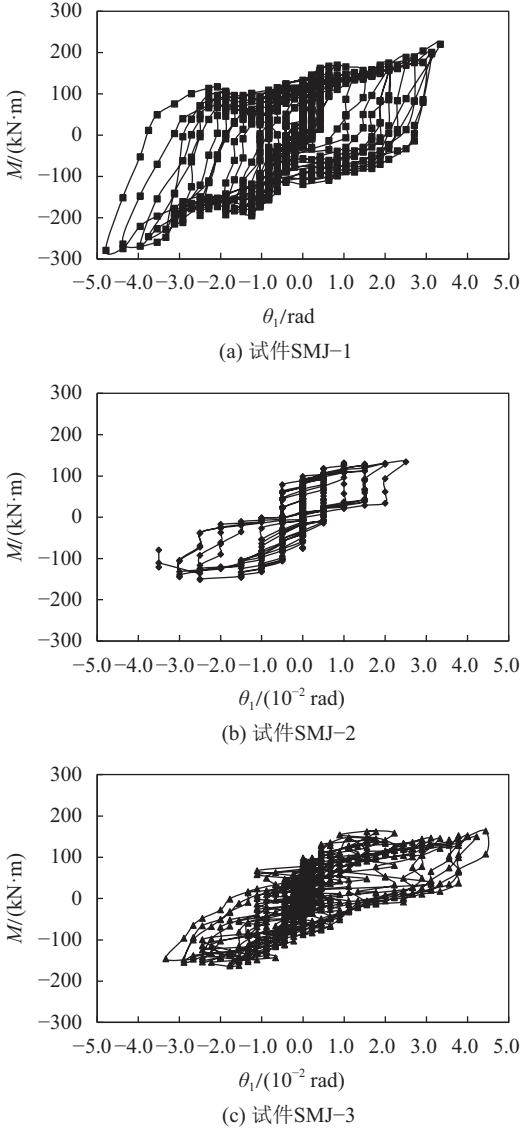


图8 梁端弯矩-节点连接转角滞回曲线

Fig.8 Hysteretic loops of beam-end moment-connection rotation

4.2 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。为了清晰揭示拟静力循环荷载作用下节点转动刚度的退化规律,本文参考文献[6]引入两种转动刚度:1)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,其中 K_{eq-A} 和 K_{eq-B} 分别为同一加载滞回环推拉方向等效转动刚度;2)

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9。

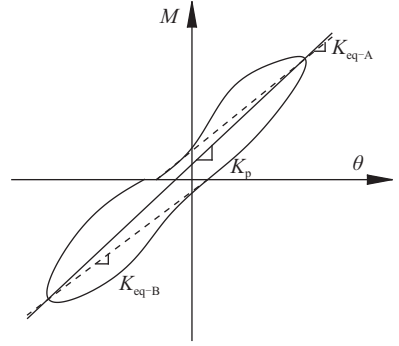


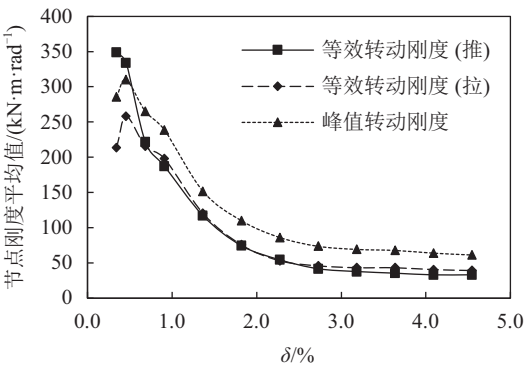
图9 转动刚度示意

Fig.9 Diagram of rotational stiffness

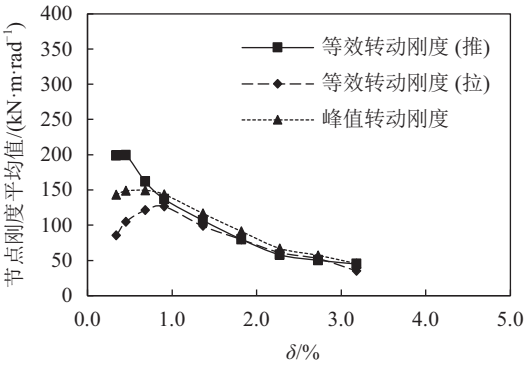
节点等效转动刚度平均值 $\bar{K}_{eq-A}$ 、 $\bar{K}_{eq-B}$ 分别取计算加载级对应 K_{eq-A} 和 K_{eq-B} 的平均值,试件峰值转动刚度平均值 $\bar{K}_p$ 取计算加载级对应 K_p 的平均值。依据梁端弯矩 M -实测相对侧移 θ 滞回曲线,计算得到各试件节点加载阶段的等效刚度平均值 $\bar{K}_{eq-B}$ 和峰值刚度平均值 $\bar{K}_p$ 衰减规律见图10和11。

对图10分析显示:1)加载初期,所有试件推拉方向等效转动刚度存在一定差异,试件先行加载推方向刚度相对后拉方向大;而随着加载的进行,推拉方向刚度逐步趋向一致。2)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。3)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,即表明了新型卷边PEC柱双向刚度接近相等;而PEC柱顶竖向力明显提高了节点初始转动刚度,但随着加载进程的推进,其二阶效应对节点转动刚度影响逐渐减弱。

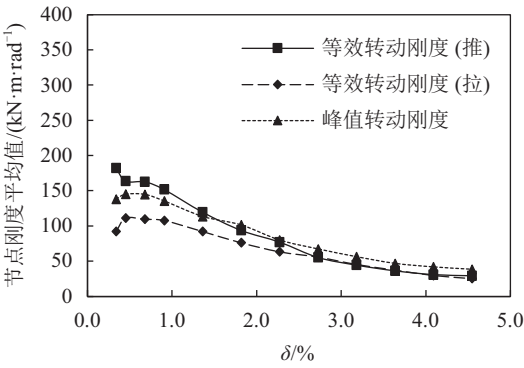
图11中可得:1)试件SMJ-1初始峰值转动刚度为285.65 kN·m/rad,而SMJ-2和SMJ-3初始峰值转动刚度分别为143.41 kN·m/rad和138.08 kN·m/rad,即进一步表明PEC柱布置对试件初始转动刚度影响较小,而PEC柱顶竖向压力明显增大了试件初始转动刚度。2)所有试件加载初期,对穿螺栓和预拉杆预应力对接触面产生的预压力未消除,试件整体处在弹性状态,峰值转动刚度衰减缓慢;随着加载的继续,摩擦T形件与钢梁端部受拉部位消压完成而出现脱开现象,随即摩擦T形件与钢梁翼缘接触面先后出现摩擦滑移,峰值转动刚度呈现明显衰减趋势,其中试件SMJ-1衰减最快,主要在于柱顶轴压力的二阶效应加快了摩擦T形件与钢梁翼缘接触面的摩擦滑移进程;加载后期,摩擦T形件与钢梁翼缘接触面摩擦滑不断加,但摩擦力基本恒定,以致试件峰值转动刚度基本趋向一致[7]。



(a) 试件SMJ-1



(b) 试件SMJ-2



(c) 试件SMJ-3

图 10 节点转动刚度退化曲线

Fig.10 Rotational stiffness degradation curves of joints

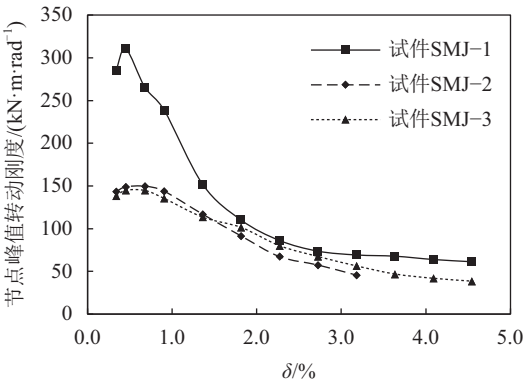


图 11 节点峰值转动刚度退化曲线

Fig.11 Peak rotation stiffness degradation curves of joints

4.3 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,为此根据梁端弯矩 M -实测侧移角 θ 滞回曲线对试件残余侧移角 θ_r 进行进一步的分析,以揭示试件的自复位功效,计算结果见图12。

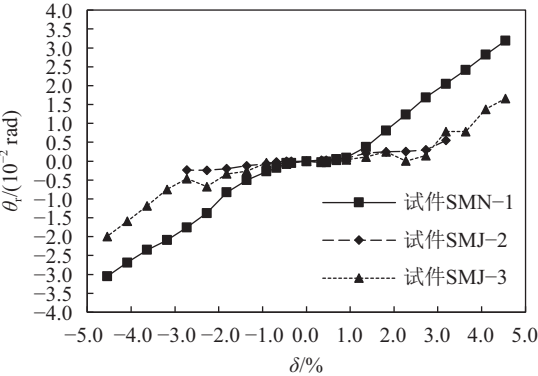


图 12 残余相对侧移角发展规律

Fig.12 Pattern of residual drift angle

对图12分析可知:①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,接触面连接密闭,试件整体处在弹性状态,卸载试件弹性恢复而基本回位;继续加载至摩擦T形件与钢梁翼缘接触面开始出现滑移过程中,首先梁端受拉部位与摩擦T形件触面消压完成并开始脱开,紧接着摩擦T形件与钢梁受拉翼缘接触面开始克服静摩擦力而产生相对滑移,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,摩擦T形件与钢梁受拉翼缘接触面摩擦滑移不断加剧,试件损伤程度加大,预拉杆自复位效果减退,试件残余相对侧移角增大。②整个试验过程中,试件SMJ-2和SMJ-3自复位功效较为理想:即加载至中震层间相对侧移限值1/50^[8]时,其残余相对侧移角小于0.005 rad,而加载接近大震层间相对侧移限值1/30^[8]时,其残余相对侧移角仍小于0.01 rad;而试件SMJ-1加载至层间相对侧移限值1.0%之前,试件基本实现完全自复位,随着加载的进行,其二阶效应加快了自复位功效的衰减。

4.4 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^[9]。本文试验试件采用的摩擦T形件部分自复位连接主要利用摩擦T形件与钢梁翼缘和加强盖板间的摩擦耗能来满足试件耗散地震能的需求,为此对梁端弯矩 M -实测侧移角 θ 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13。

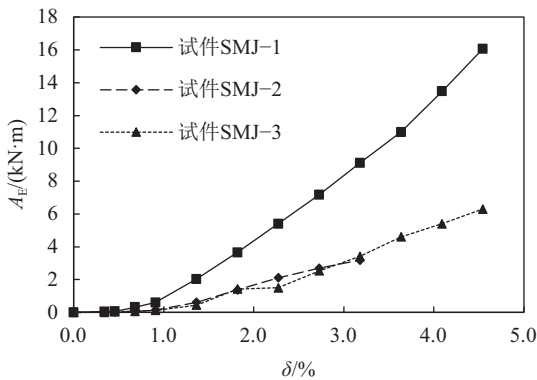


图 13 试件滞回耗能曲线

Fig.13 Hysteretic energy-dissipation curves of specimens

通过对图13进行对比分析发现:1)试件SMJ-1耗能发展速度明显快于试件SMJ-2和SMJ-3,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;2)采用PEC柱弱轴布置的试件SMJ-3耗能发展速度与试件SMJ-2基本相同,这进一步验证新型卷边PEC柱充分表明新型卷边PEC柱能更好满足竖向构件“双向等刚度”的设计要求。

5 节点传力机理

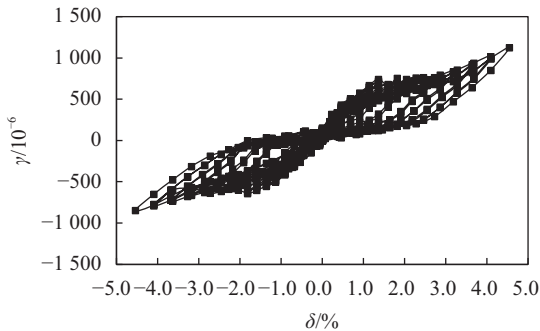
框架结构的梁柱节点区位于梁柱交接部位的柱中,在梁传来的内力作用下容易发生剪切破坏。通过对本文试件节点区应变花测试数据分析(见图14),得出试件SMJ-1、SMJ-2和SMJ-3的节点区最大剪应变分别为 1.124×10^{-3} 、 0.743×10^{-3} 和 1.228×10^{-3} ,剪切变形极小,主要源于试件增设的节点加强板增大了对节点区混凝土的约束作用,从而提高了节点区刚度,更好实现了“强节点”的抗震设计要求。

为了更准确揭示本文试件节点连接的传力机理,参考文献[6],本文试件节点连接传力机理为: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,使得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好的优势,有效降低了节点区剪切性能的要求,更好满足了“强节点弱构件”的抗震设计原则,节点传力机理见图15。

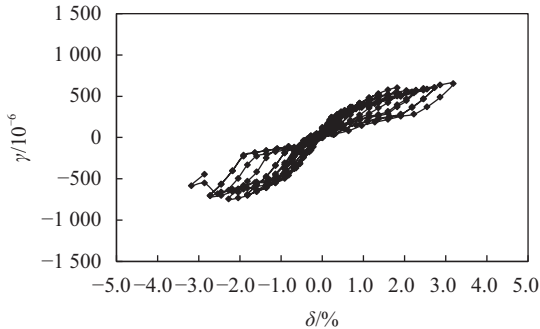
6 结 论

通过对3个大比例摩擦T形件部分自复位连接新型卷边PEC柱-钢梁组合框架边节点试件的抗震性能试验研究,提出以下结论与建议:

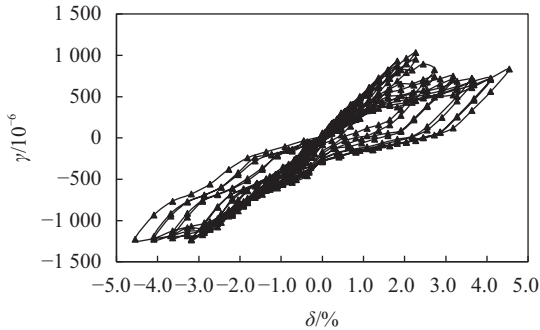
1)摩擦T形件部分自复位连接通过设置预拉杆和辅助摩擦T形件以实现其部分自复位功效和满足结构耗散地震能的需求,且保证了结构主要受力构件基本处在弹性状态。



(a) 试件SMJ-1



(b) 试件SMJ-2



(c) 试件SMJ-3

图 14 节点区剪应变曲线

Fig.14 Shear strain curves of the panel zone

2)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。

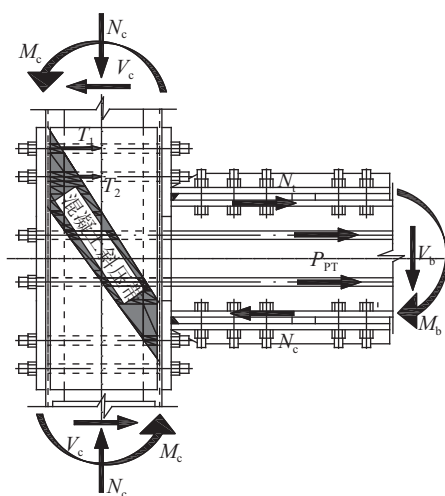
3)新型卷边PEC柱截面布置对初始转动刚度、刚度退化和初期耗能发展进程影响极小,充分表明新型卷边PEC柱更好满足竖向构件“双向等刚度”的设计要求。

4)整个试验过程中,试件SMJ-2和SMJ-3自复位功效较为理想,即加载至中震层间相对侧移限值1/50时,其残余相对侧移角小于0.005 rad,而加载接近大震层间相对侧移限值1/30时,其残余相对侧移角仍小于0.01 rad;而试件SMJ-1加载至层间相对侧移限值1.0%之前,试件基本实现完全自复位,随着加载的进行,其二阶效应加快了自复位功效的衰减。

5)由于PEC柱顶竖向力明显加快了预拉杆自复位功效的衰减速度,为此建议对预拉杆预应力度进行进一步研究,以提出更合理的设计取值。



(a) 试验实体



(b) 节点传力示意

图 15 节点区传力机理

Fig.15 Force-transfer mechanism of the panel zone

参考文献:

- [1] Rojas P, Ricles J, and Sause R. Seismic performance of post-tensioned steel moment resisting frames with friction devices[J]. Journal of Structure Engineering, 2005, 131(4): 529–540.
- [2] Kim H J, Christopoulos C. Friction damped posttensioned self-centering steel moment-resisting frames[J]. Journal of Structure Engineering, 2008, 134(11): 1768–1779.

- [3] Iyama J, Seo C-Y, Ricles J M, Sause R. Self-centering MRFs with bottom flange friction devices under earthquake loading[J]. Journal of Construction Steel Research, V65: 314–325, 2009.
- [4] Lin Y C, Ricles J M, and Sause R. Earthquake simulations on self-centering steel moment resisting frame with web friction devices[C]//Proceeding of the ASCE Structures Congress, Austin, 2009.
- [5] Zhao Kai, Fang Youzhen, Yang Yonglong. Numerical simulation on seismic performance of innovative PEC column-steel beam interior joint with post-tensioned friction damped connection[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(3): 97–105. [赵凯, 方有珍, 杨永龙. 新型PEC柱-钢梁摩擦耗能型部分自复位连接中节点抗震性能数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(3): 97–105.]
- [6] Fang Youzhen, Zhao Kai, Chen Yun, 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(1): 22–30. [方有珍, 赵凯, 陈贇, 等. 新型PEC柱-钢梁中节点摩擦耗能型部分自复位连接抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 22–30.]
- [7] MATHEW D S. Seismic testing and analytical studies for development of new seismic force resisting systems for metal buildings[D]. San Diego, University of California, 2013.
- [8] FEMA-273. NEHRP commentary on the guidelines for the rehabilitation of buildings[S]. Washington, Federal Emergency Management Agency, 1996.
- [9] Fang Youzhen, Yang Bin, Niu Rongbin et al. Test study on Seismic Mechanism of interstory substructure of innovative PEC column-steel beam frame with end-plate connections[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2015, 47(6): 1–8. [方有珍, 杨彬, 钮荣斌, 等. 新型PEC柱-钢梁端板连接组合框架层间抗震机理试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(6): 1–8.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Fang Youzhen, Ma Xueyu, Geng Suqi, et al. Experimental investigation on seismic performance of exterior joint with partial self-centering friction damped connection in composite frame[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(3): 76–84. [方有珍, 马雪玉, 耿苏齐, 等. 摩擦耗能部分自复位连接组合框架边节点抗震性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 76–84.]