

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.005

卷边 PEC 柱(弱轴)-钢梁 组合框架层间抗震机理试验研究

冯 进,包张君,方有珍,王玉玺

(苏州科技大学江苏省结构重点实验室,江苏 苏州 215011)

摘要:为揭示新型卷边 PEC 柱(弱轴)-削弱截面钢梁组合框架结构的层间抗震机理,按 1:2 缩尺比例设计制作 1 榀组合框架层间子结构试验试件并进行低周往复荷载试验。基于试验观察和数据整理,对试件结构的破坏过程与破坏模式、滞回特性、刚度退化、耗能能力与变形模式等抗震性能进行分析。结果显示:试件结构最终破坏模式为梁端削弱截面处充分屈服形成塑性铰的理想塑性破坏机构;试件中间层推拉方向位移延性系数 μ_u 分别为 3.91 和 3.97,层间最大等效黏滞阻尼系数 $(\zeta_{eq})_{max}=0.359$;试件结构侧移分布规律呈理想的倒三角弯剪型变形模式;试件结构在承载力下降到极限承载力的 85% 时,对应试件层间相对侧移大于 4.9%,而节点转角最小值为 0.366 rad,均超过大震层间侧移限值下限的 1/30,表明试件具有良好的抗倒塌性能。

关键词:新型 PEC 柱;削弱截面梁;组合框架层间子结构;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(2016)04-0309-08

Experimental study on seismic mechanism of inter-story substructure of PEC column (weak axis)-steel beam composite frame

FENG Jin, BAO Zhangjun, FANG Youzhen, WANG Yuxi

(Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to examine the seismic mechanism of a new partially encased concrete (PEC) column (weak axis)-steel beam (reduced beam section) composite frame, a 1:2 specimen of the inter-story substructure was designed and built. A test of the specimen was conducted with lateral low-cycle repeated loading. Based on the test observation and data analysis, the seismic performance of the specimen, including the failure process, failure mode, hysteretic property, lateral stiffness degradation, energy dissipation capacity, and deformation pattern, was analyzed. Test results show that the failure mode is primarily induced by the plastic hinge forming in the reduced beam section. The displacement ductility coefficients of the inter-story in the pushing and pulling direction are 3.91 and 3.97, respectively, and the maximum equivalent viscous damping ratio is 0.359. The drift distribution of the specimen shows the ideal inverted triangle pattern of the flexure-shear type. When the load-carrying capacity of the specimen is decreased to 85% of its ultimate strength, the inter-story drift ratio is greater than 4.9% and the minimum connection rotation is 0.366 rad, which all surpass the lower limit (1/30) of inter-story drift at the maximum considered earthquake level, indicating that the specimen has high collapse prevention capacity.

Key words: new PEC column; beam with reduction section; inter-story substructure of composite frame; lateral low-cycle repeated loading test; seismic mechanism

部分外包混凝土组合柱(partially encased concrete composite column, PEC 柱)是在热轧薄壁钢板组合截

收稿日期:2015-07-09

基金项目:国家自然科学基金(51478286, 51078247);江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人资助项目(2014)

作者简介:冯进(1977—),男,江苏扬州人,高级工程师,主要从事钢结构抗震性能研究。E-mail:345890905@qq.com

通信作者:方有珍,教授。E-mail:fyz72@mail.usts.edu.cn

面翼缘处设置拉结筋(非卷边翼缘)^[1-3]或拉结板条(卷边翼缘)^[4-5]形成钢构架,并在其内浇注混凝土形成的新型组合构件。现有研究表明:钢构架部分明显增强对混凝土的约束,提高混凝土对构件承载力和水平抗侧刚度的贡献,改善构件抗震延性;而笔者提出的翼缘卷边构造进一步消除了常规部分外包混凝土组合柱(PEC)双向刚度明显差异和翼缘间设置拉结筋带来的施工困难等缺陷。同时,国内外学者在梁柱节点采用端板预拉对穿螺栓和狗骨式连接件方面取得了系列研究成果^[6-12]。研究发现:(a)端板预拉对穿螺栓连接是一种半刚性连接方式,螺栓预拉力使其具有部分自复位功效;对穿螺栓有效将梁端拉力转换为混凝土压力,从而实现节点域混凝土斜压带传力模式;可工厂制作、现场组装,较大程度消除了焊接残余应力的不利影响。(b)狗骨式连接通过对梁端截面削弱实现地震作用下塑性铰出现位置远离节点区连接焊缝,不仅满足了结构耗散地震能需求,而且能更好地满足“强节点弱构件”的抗震设计需求^[13]。

迄今为止,国内外对 PEC 柱相关结构的研究主要集中在构件和节点连接方面,而基于结构体系层面上的研究成果十分有限,尤其是结构体系的层间抗震机理的研究。为此,本文对 1 榀新型 PEC 柱(弱轴)-钢梁(削弱截面)组合框架中间层子结构进行低周往复荷载试验,分析其破坏模式、滞回特性、刚度退化、耗能能力与侧移变形模式等,揭示试件结构的层间抗倒塌机理。

1 试验概况

1.1 试件设计

以实际层高为 3.0 m 的框架结构为研究对象,提取中间层相连的上下层柱反弯点之间的单跨层间子结构为试验试件原型,基于苏州科技大学江苏省结构重点实验室加载设备能力,按照 1:2 缩尺制作试件模型。PEC 柱采用 Q235 钢板焊接组合截面(翼缘 2-310×5(翼缘外伸端部卷边长度 30 mm)、腹板 240 mm×5 mm、拉结板条 220 mm×30 mm×4 mm,所有焊缝均采用角焊缝,且组合截面弱轴布置),混凝土设计强度等级为 C20;钢梁采用 I20a 工字钢;端板与 PEC 柱采用 10.9 级 M20 对穿高强螺栓进行连接(设计预紧力为 10 kN),与钢梁采用坡口对接焊缝,试件设计见图 1。钢板组合截面及工字钢翼缘与腹板各取 3 个材性试样,材性实测值见表 1;混凝土每批预留 3 个标准立方体试块(边长为 150 mm),实测立方体强度平均值 $f_{cu,m}=19.6\text{ MPa}$ 。

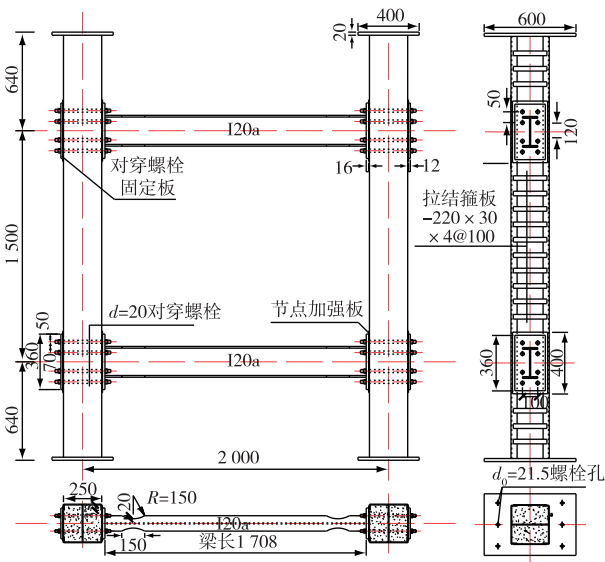


图 1 试件设计(单位:mm)
Fig. 1 Design of specimen(units:mm)

表 1 试件材料性能指标实测值
Table 1 Measurements of material performance indices of specimen

试样		f_y/MPa	f_u/MPa	$E/10^5\text{ MPa}$	$\delta/\%$
钢板组合截面(Q235)	翼缘与腹板	294.0	414.0	2.01	22.8
	翼缘	293.0	440.0	1.95	21.3
	腹板	296.4	446.3	1.98	19.9
I20a(Q235)					

1.2 测点布置

位移传感器布置:在 A 柱侧不同高度位置布置位移传感器用于测量试件结构侧移;在梁柱节点连接部位设置位移传感器以测试节点连接与梁端转动性能力,见图 2。应变片布置:梁柱节点区应变花测试其剪切变形;梁削弱部位沿截面高度布置应变片和应变花测试截面应变以判别截面进入屈服进程和计算内力。

1.3 试验装置与加载方案

试验在苏州科技大学江苏省结构重点实验室进行,为了模拟试件子结构柱反弯点,试件柱下端通过平面铰支座与刚性地梁连接,柱上端通过平面铰支座与刚性加载梁连接,且在加载梁侧设置平面外支撑以防止试

件整体发生面外扭转,具体见图2。

试验选取位移加载方式:正式加载之前实施预加载,以检查测试仪表是否正常工作;正式加载后,以7.5 mm为初始级,前6级按7.5 mm(试件相对侧移为0.25%)递增;随后按15 mm(试件相对侧移0.50%)递增,每级荷载为2个循环,直至试件承载力下降至加载历史最大承载力的85%或试件层间侧移比超过大震层间侧移限值下限的1/30,试验方可结束。试验结束条件为获得试件完整的抗倒塌性能提供了保障。

2 试验结果分析

2.1 滞回特性

试件在水平低周往复荷载下的滞回曲线可基本反映其承载力、刚度退化、耗能能力等力学性能。试件滞回曲线如图3所示。 $\theta = \Delta/H$, $\theta_1 = \Delta_1/h$, 其中 H 、 h 分别为试件整体高度与中间层高。

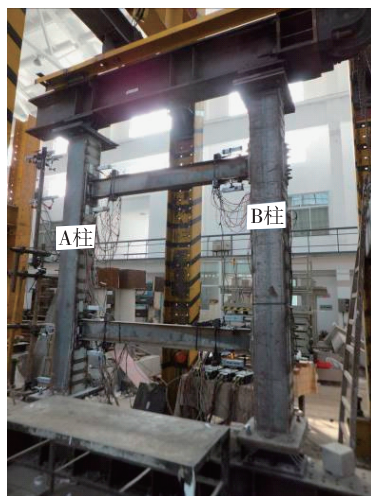


图2 试验加载装置

Fig. 2 Instrumentations for loading of specimen

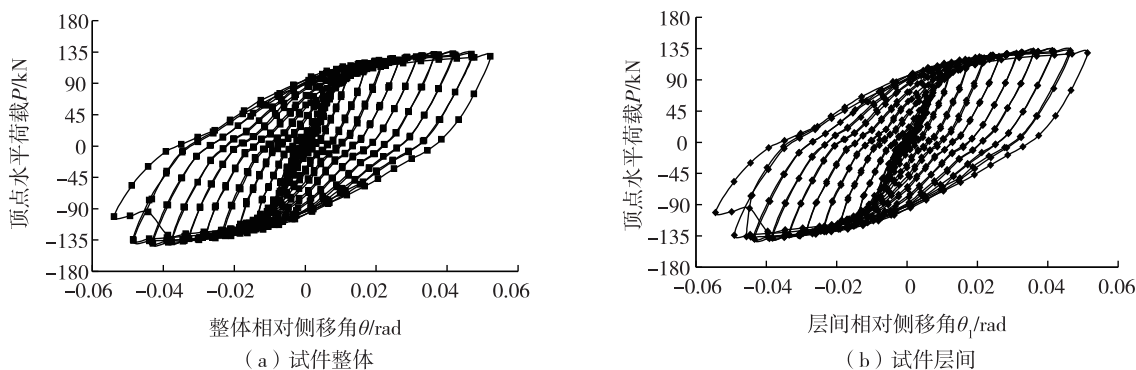


图3 试件滞回曲线

Fig. 3 Hysteretic curves of specimen

从图3试件整体、层间滞回曲线对比可知:加载初期,试件处在弹性阶段,滞回曲线基本成直线,刚度和承载力较大,少量的滞回耗能由 PEC 柱混凝土挤压密实和连接缝隙挤密引起,且结构无残余变形;加载至相对侧移1.0%级过程中,梁削弱部位开始出现屈服起皮;继续加载至相对侧移2.0%,梁削弱部位屈服线基本贯穿整个截面,端板脱开较明显,滞回曲线有明显的捏缩效应,主要源于预拉对穿螺栓弹性变形在卸载过程中自行恢复造成试件具有部分自行复位功效;继续加载,梁削弱部位塑性铰区逐渐向梁端扩展,试件耗能增大趋势明显,而预拉对穿螺栓弹性变形量相对恒定,以致卸载时其自复位效果维持恒定;加载至相对侧移4.5%过程中,试件B柱上节点连接处上翼缘受压屈服而发生面外变形,试件承载力出现小幅度下降,而加载至相对侧移5.5%,试件A柱下节点梁端受拉断裂,试件负向承载力下降至极限强度的85%以下,则试验结束。

2.2 骨架曲线

试件水平荷载-侧移骨架线可直观反映加载过程中试件力学性能的发展进程,基于滞回曲线得到的试件整体与层间骨架曲线对比见图4。通过对图4分析表明:(a)加载至试件整体与层间相对侧移达到1.0%之前,水平荷载与相对侧移基本成直线,试件结构处在弹性状态;当试件实现理想的层间倒塌机构(即梁端削弱截面处全截面屈服形成塑性铰),承载力达到峰值时对应层间相对侧移达到4.13%,即表明试件结构实现了“小震不坏(层间相对侧移限值1/250~1/200,结构处在弹性状态)、中震可修(层间相对侧移限值1/50,结构在弹塑性状态)、大震不倒(层间相对侧移限值1/30~1/20,结构承载力未下降到极限承载力85%)”的三水准设防目标。(b)试件加载后期由于试件A柱下节点梁端受拉断裂,试件负向承载力下降至极限强度的85%以下,而对应试件整体与层间位移延性系数 $\mu_u = \delta_u / \delta_y$ (其中 δ_y 为试件结构屈服位移, δ_u 为试件承载力下

降到极限承载力的85%对应的破坏位移)分别大于4.06和3.91,即验证了试件具有良好的抗震延性。(c)整个加载过程中,试件整体和层间骨架线基本重合,原因在于试件采用的新型卷边PEC柱具有较大的抗侧刚度与承载力,且梁削弱截面较好地实现塑性铰区外移,试件更好满足“强柱弱梁”和“强节点”的抗震设计要求,以致试件结构表现出整体性好、水平抗侧刚度沿高度分布均匀。

2.3 抗侧刚度退化

结构随着荷载循环次数的增加导致结构刚度退化的趋势,反映了结构在受力过程中的损伤进程。引入峰值抗侧刚度 K_p 和等效刚度 K_{eq} ,其中 K_p 为每次循环加载最大水平位移 Δ_i 点之间连线的斜率,而 K_{eq} 为每次循环加载最大水平位移 Δ_i 点与原点连线之间连线的斜率,如式(1)、式(2)所示。

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

$$K_{eq}^\pm = \frac{|P_i^\pm|}{|\Delta_i^\pm|} \quad (2)$$

式中: Δ_i^+ 、 Δ_i^- ——第 i 次循环加载滞回环正、反方向层间最大水平位移; P_i^+ 、 P_i^- —— Δ_i^+ 、 Δ_i^- 对应的水平荷载。

为研究层间抗震机理,故仅对层间抗侧刚度退化规律进行分析,计算结果见图5。图5显示:初期加载至相对侧移0.5%级过程中,试件连接部位间隙和PEC柱混凝土挤压密实,层间抗侧刚度出现一定幅度的增大过程;随后加载至相对侧移1.0%级梁削弱截面处开始屈服之前,试件处在弹性阶段,层间水平抗侧刚度变化不明显;随着加载继续,梁削弱截面处屈服不断向截面中部发展,层间水平抗侧刚度退化速度加快;当加载至相对侧移2.0%级,梁削弱截面基本全截面屈服;随后加载至相对侧移5.5%级试验结束,梁削弱截面处塑性铰区不断向梁端扩展,层间水平抗侧刚度退化速度趋于平缓,表明试件结构具有较好的整体性和抗倒塌能力。

2.4 梁柱节点连接性能

梁柱节点区、连接和梁柱之间的刚度合理匹配决定了框架结构体系整体性和力学性能,因此,笔者进一步对节点性能进行分析。

2.4.1 节点滞回曲线

试验现象证实试件最终破坏源于梁削弱截面处充分屈服形成塑性铰,取梁削弱部分靠近柱1/4处截面弯矩为梁端参考弯矩 M ,梁端与PEC相对转角为连接转角 θ_2 ,梁端与端板相对转角为梁端转角 θ_3 。根据图6所示框架结构在水平荷载作用下的力平衡条件得

$$\begin{cases} \frac{P}{2}H_{\text{总}} = 2V_b \frac{L}{2} \\ M = V_b l \end{cases} \quad (3)$$

式中: $H_{\text{总}}$ ——试件PEC顶底平面铰支座中心距离; L ——框架跨度; V_b ——梁上剪力; l ——弯矩 M 计算截面距框架梁跨中距离。

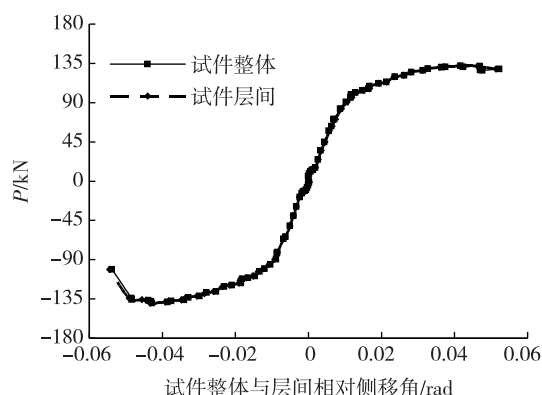


图4 试件骨架曲线

Fig. 4 Skeleton curves of specimen

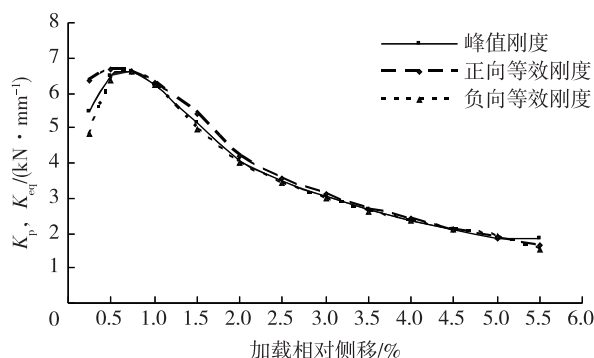


图5 层间抗侧刚度退化曲线

Fig. 5 Lateral stiffness degradation curves of inter-story

基于试验数据计算得到节点连接转角 θ_2 与梁端转角 θ_3 滞回曲线,见图7。对图7加以分析可知,在加载至相对侧移 1.0% 级后,梁端参考弯矩超过其屈服弯矩 ($M_{\min} = 44.09 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_y \approx 43.86 \text{ kN} \cdot \text{m}$),即截面已经进入屈服;随着加载继续至相对侧移 2.0% 级,梁端参考弯矩超过全截面塑性弯矩 ($M_{\min} = 55.56 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_p = 52.32 \text{ kN} \cdot \text{m}$),即截面充分屈服形成理想的延性破坏模式,节点转动能力发挥充分;加载至相对侧移 5.5% 试验结束,试件负向承载力下降至 85% 极限强度,对应的节点连接转角和梁端转角均超过大震层间相对侧移限值的 1/30。因此现行相关规范所规定的最大塑性转角 0.03 rad 在一定程度上保证了抗弯框架出现理想延性失效模式和具有良好的抗倒塌能力。

为了揭示节点区对整个节点受力性能的影响规律,基于节点区应变变化的实测数据,依据公式 $\gamma = 2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ} - \varepsilon_0$ 计算得到节点区剪应变。计算结果显示,整个加载过程中,所有节点区最大剪应变 $\gamma_{\max} = 975.72 \mu\varepsilon$,表明节点区剪切变形较小,对节点整体性能影响甚微,这也进一步验证了本文试件采用增设节点加强板构造措施相应提高了节点区混凝土的约束作用,且端板对穿螺栓连接实现了节点区混凝土斜压带传力模式^[8-9],较好地满足了“强节点”的抗震设计需求。

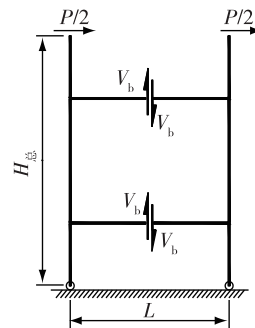


图6 试件传力机理

Fig. 6 Load-transfer mechanism of specimen

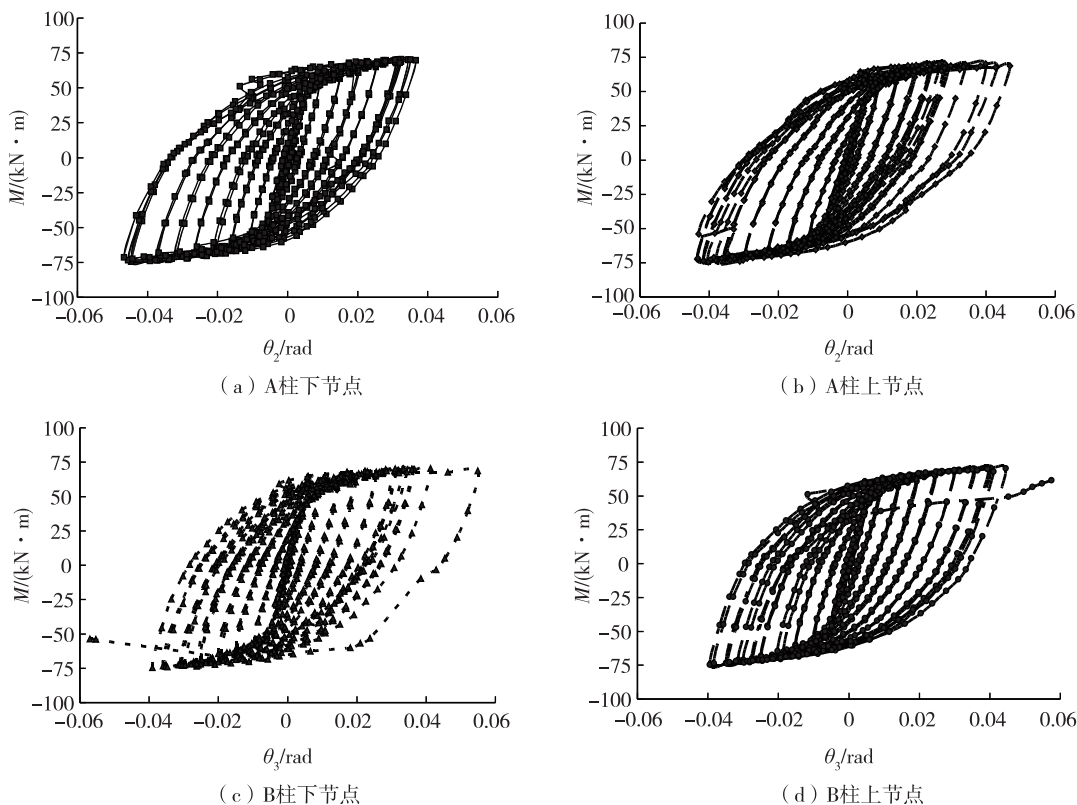


图7 节点连接弯矩-转角滞回曲线

Fig. 7 Bending moment-rotation angle hysteretic curves of joint connection

2.4.2 节点转动刚度退化

试件节点区较强,节点转动能力主要取决于节点连接。为此,对节点转动刚度 K_{PM} 进行分析,表征方法同层间抗侧刚度,计算结果见图8。从图8中可以得出:初期加载至相对侧移 0.5% 级时,试件连接部位间隙挤压密实,节点连接和梁端初始转动峰值刚度退化较快;加载至相对侧移 1.0% 级,梁削弱部分靠近柱 1/4 处截面进入屈服,连接和梁端转动峰值刚度退化速度有所平缓;随后加载到侧移 2.0% 级,梁削弱部分靠近柱 1/4 处截面进入全截面屈服过程中,节点连接转动峰值刚度退化趋势进一步加剧;随后继续加载至试验结束,梁削弱部位塑性区逐渐向梁端扩展,节点转动峰值刚度退化趋势平缓,进一步验证试件具有良好的整体性和抗倒塌能力。

2.5 耗能能力

结构的耗能能力可从滞回曲线包围的面积滞回耗能和等效黏滞阻尼系数2个方面进行分析。

2.5.1 滞回耗能

为了系统分析试件层间耗能机理,对试件整体 $P-\theta$ 、层间 $P-\theta_1$ 和节点连接 $M-\theta_2$ 与 $M-\theta_3$ 滞回曲线面积 A_E 及其对整体耗能贡献的比值 η_E 分别进行计算,结果见图9。从图9(a)中可看出:试件处在弹性阶段,少量的耗能由试件连接加工缝隙和混凝土的挤压密实引起;加载相对侧移1.0%级梁削弱部分靠近柱1/4处截面进入屈服至相对侧移5.0%级过程中,结构耗能增幅显著;随后加载至相对侧移5.5%级试验结束,由于试件A柱下节点梁端受拉断裂,相应延缓了塑性区的扩展速度,试件各部分耗能变化趋势明显减缓。图9(b)显示,加载至梁削弱部分靠近柱1/4处截面进入屈服后,层间耗能约为试件整体耗能的50%~60%,而单个连接或梁端耗能占试件整体耗能的20%以上,这进一步试件耗能主要由节点连接梁端梁削弱部分屈服提供,实现了理想的延性耗能模式。

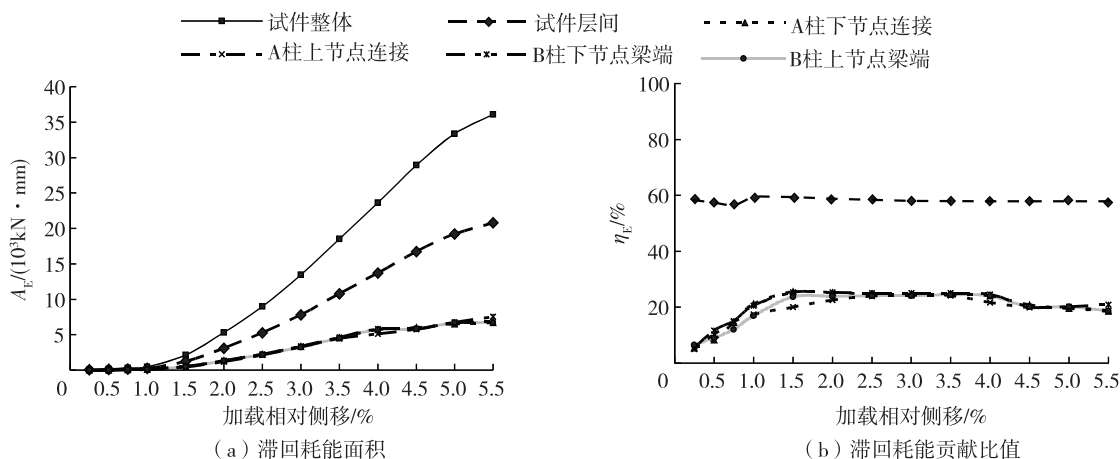


图9 滞回耗能

Fig. 9 Hysteretic dissipated energy of specimen

2.5.2 等效黏滞阻尼系数

等效黏滞阻尼系数 ζ_{eq} 能合理评定试件耗散地震能力和反映结构的损伤程度,一般可基于试件的滞回线环所包围的面积进行计算得到。图10给出了试件整体、层间和节点的相关的等效黏滞阻尼比随加载侧移量的变化曲线。对图10进行分析可知:(a)加载初期,试件处在弹性工作阶段,PEC柱混凝土和试件连接处缝隙的挤压密实耗能,等效黏滞阻尼系数增大,挤压密实后试件等效黏滞阻尼系数基本维持在0.05左右;(b)加载相对侧移1.0%级梁削弱部分靠近柱1/4处截面进入屈服至相对侧移2.0%级全截面屈服过程中,试件各部分等效黏滞阻尼系数增长速度明显加快;(c)继续加载至相对侧移4.5%级B柱上节点梁上翼缘出现局部屈曲之前,由于梁削弱部分塑性区域向梁端扩展,等效黏滞阻尼系数增大趋势趋向平缓;(d)随后加载至相对侧移5.5%级试件A柱下节点梁端受拉断裂而宣告试验结束,由于B柱上节点梁上翼缘出现局部屈曲,相应降低了塑性区的扩展速度,试件各部分等效黏滞阻尼系数有所减小。此外,通过对试件整体、层间和

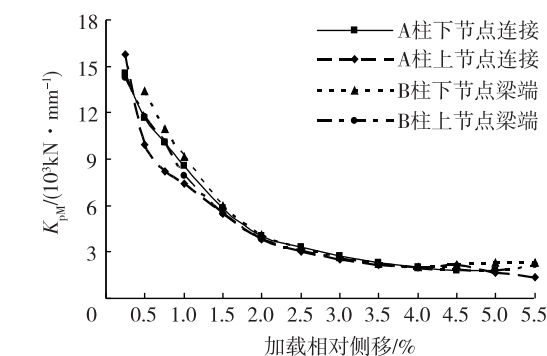


图8 节点连接与梁端峰值转动刚度退化曲线

Fig. 8 Peak rotational stiffness degradation curves of joint connection and beam end

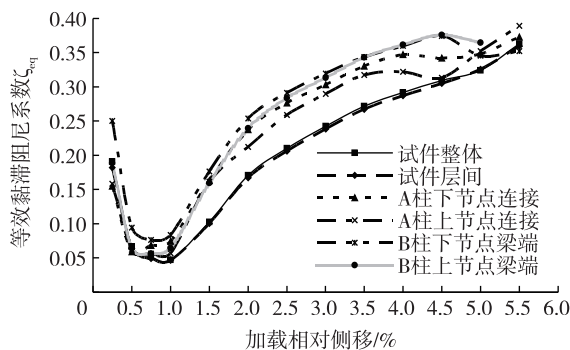


图10 试件的等效黏滞阻尼比

Fig. 10 Equivalent viscous damping ratios of specimen

节点的等效黏滞阻尼比对比分析发现:试件整体与层间变化曲线基本重合,即试件结构整体耗能均匀;梁端等效黏滞阻尼系数较节点连接稍大,但规律相同,且两者曲线明显高于试件整体和层间对应值,原因在于试件主要由梁端削弱截面屈服耗能;结构整体与层间最大等效黏滞阻尼系数(ζ_{eq})_{max}分别为 0.363 和 0.359,表明试件结构具有良好的耗能能力。

2.6 侧移变形模式

结构侧移变形模式反映出抗侧力结构体系的受力变形机理。沿试件高度方向设置了 5 个位移传感器,基于试验测试数据处理,得到不同加载级下试件沿高度水平位移曲线,见图 11。从图 11 中可以看出,试验加载过程中,试件侧移呈现理想的倒三角弯剪型变形模式,进一步验证了试件结构整体性好、水平抗侧刚度沿高度分布均匀。

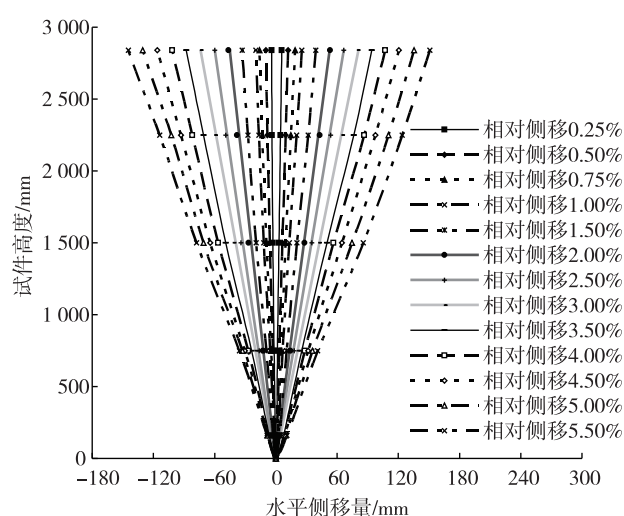


图 11 试件水平侧移变形模式

Fig. 11 Lateral drift patterns of specimen

3 结 论

a. 新型 PEC 柱(弱轴)-钢梁(削弱截面)端板连接组合框架子结构在水平循环荷载下经历 3 个阶段:弹性阶段Ⅰ、梁削弱部分截面屈服阶段Ⅱ、梁削弱部分截面屈服区向梁端扩展阶段Ⅲ,有效实现了框架结构“小震不坏(层间相对侧移限值 1/250~1/200,结构处在弹性状态)、中震可修(层间相对侧移限值 1/50,结构在弹塑性状态)、大震不倒(层间相对侧移限值 1/30~1/20,结构承载力仍未下降到极限承载力的 85%)”的三水准设防目标。

b. 新型 PEC 柱(弱轴)-钢梁(削弱截面)端板连接组合框架子结构层间位移延性系数 $\mu_u = 3.91$ (推)/3.97 (拉)和最大等效黏滞阻尼系数(ζ_{eq})_{max} = 0.359,即试件结构具有良好抗震延性和耗能能力。

c. 新型 PEC 柱(弱轴)-钢梁(削弱截面)端板连接组合框架子结构侧移表现为理想的倒三角弯剪型变形模式,表明试件整体性好、水平抗侧刚度沿高度分布均匀。

d. 新型 PEC 柱(弱轴)-钢梁(削弱截面)端板连接组合框架子结构整体与层间相对侧移和节点转角均超过大震层间侧移限值 1/30,即试件结构具有良好的抗倒塌能力。

e. 新型 PEC 柱(弱轴)-钢梁(削弱截面)端板连接组合框架子结构的最终破坏模式为梁削弱部分截面充分屈服形成塑性铰的理想塑性破坏机构。

参考文献:

- [1] CHICOINE T, MASSICOTTE B, TREMBLAY R. Long-term behavior and strength of partially encased composite columns with built-up shapes[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(2):141-150.
- [2] 方有珍,陆佳,马吉,等.薄壁钢板组合截面 PEC 柱(强轴)滞回性能的试验研究[J].土木工程学报,2012,45(4):48-55. (FANG Youzhen, LU Jia, MA Ji, et al. Hysteretic behavior of PEC columns (strong axis) with thin-walled composite section [J]. Journal of Civil Engineering, 2012, 45(4):48-55. (in Chinese))
- [3] 方有珍,顾强,申林,等.薄壁钢板组合截面 PEC 柱(弱轴)滞回性能的试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(4):113-120. (FANG Youzhen, GU Qiang, SHEN Lin, et al. Hysteretic behavior study of PEC columns (weak axis) fabricated with thin-walled built-up section by full scale[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4):113-120. (in Chinese)).
- [4] 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 behaviors 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))
- [5] 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 behaviors of PEC columns(strong axis) fabricated with

- crimping thin-walled built-up section by full scale[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3):181-190.(in Chinese))
- [6] RICES J M, PENG S W, LU L W. Seismic behavior of composite concrete filled steel tube column-wide flange beam moment connections[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(2):223-232.
- [7] 石永久,王萌,王元清,等.钢框架端板连接半刚性节点受力性能分析[J].工程力学,2011,28(9):51-58.(SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing, et al. Analysis on the behavior of steel frame end-plate connections[J]. Engineering Mechanics,2011,28(9):51-58.(in Chinese))
- [8] 马吉,方有珍,陆承铎,等.薄钢板 PEC 柱-钢梁端板对拉螺栓连接滞回性能试验研究[J].工程力学,2013,30(6):107-115, 123.(MA Ji, FANG Youzhen, LU Chengduo, et al. Hysteretic behavior study on connection of PEC column—steel beam with end plates and high-strength penetrating bolts[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6):107-115,123.(in Chinese))
- [9] 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]. Journal of Building Structures, 2014, 47(7):53-62.(in Chinese))
- [10] JONES S L, Fly G T, ENGELHARDT M D. Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connection[J]. Journal of Structural Engineering, 2002,128(4):441-451.
- [11] 郁有升,王燕.钢框架梁翼缘削弱型节点力学性能的试验研究[J].工程力学,2009,26(2):168-175.(YU Yousheng, WANG Yan. Experimental study on the mechanical property of reduced beam section of steel frames[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2):168-175.(in Chinese))
- [12] 张思敏,李军,李文明.翼缘加强型狗骨式节点的性能分析及改进[J].钢结构,2010,25(133):3-7.(ZHAN Simin, LI Jun, LI Wenming. Performance analysis and improvement of flange reinforced dog-bone connection in steel frame[J]. Steel Construction, 2010, 25(133):3-7.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

· 简讯 ·

河海大学王沛芳教授获第十一届光华工程科技奖青年奖

第十一届光华工程科技奖颁奖大会于2016年6月1日在北京举行,1位专家获成就奖,33位专家分别获得工程奖和青年奖。河海大学环境学院院长王沛芳教授荣获青年奖。

王沛芳教授现任河海大学环境学院院长,国家自然科学基金创新研究群体项目负责人,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,国家杰出青年科学基金、何梁何利基金科学与技术创新奖获得者。主要从事水资源保护、水环境污染控制、生态修复理论和技术等方面的科研与教学工作,获得省部级及以上奖励14项,其中国家自然科学二等奖1项、国家技术发明二等奖1项、国家科技进步二等奖3项、中国专利优秀奖1项。

光华工程科技奖由中国工程院管理,被誉为中国工程科技界最高奖项,旨在奖励工程科技及工程管理领域取得突出成绩和重要贡献的中国优秀工程师、科学家,包括成就奖、工程奖、青年奖,每两年颁发1次。1996年首届颁奖迄今,共奖励涉及机械、运载、信息、电子、化工、冶金、材料、能源、矿业、土木、水利、建筑、环境、轻纺、农业、医药、卫生、工程管理等领域的234位院士、专家。

(本刊编辑部供稿)