

钢梁与PEC柱组合结构的抗震性能分析

冯超¹, 仇富强²

(1. 铜陵职业技术学院, 安徽 铜陵 244061; 2. 上海理工大学, 上海 200093)

摘要:对钢梁与PEC柱半刚性连接组合结构进行抗震性试验研究,共设计了4根不同连接类型的整体框架试件。通过施加低周水平反复荷载,研究钢梁与PEC柱组合结构的协同工作性能,分析端板厚度、角钢设置、螺栓间距等因素对整体框架抗震性能的影响。试验结果表明:组合结构屈服机制符合“强柱弱梁”的抗震设计要求,梁顶翼缘变形严重并形成塑性铰,柱根部鼓曲进入塑性。增加端板厚度和减小螺栓间距可以增大转动延性、提高承载极限、改善初始刚度;各框架延性性能良好,其位移延性系数均大于2.6,且端板连接的框架延性高于角钢连接的框架;等效粘滞阻尼系数 h_e 的数值在0.84~1.14之间,各框架抗震性能良好。

关键词:钢梁;组合结构;PEC柱;抗震性能。

中图分类号:TU398^{+.9} **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2019)04-0052-06

Analysis of the Anti-seismic Performance of the Composite Structure of Steel Beam and PEC Column

FENG Chao¹, QIU Fuqiang²

(1. Tongling Polytechnic, Tongling, Anhui 244061, China;

2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this study, the anti-seismic performance test of semi-rigid composite structures with steel beam and PEC column is conducted, and four integral frame specimens with different connection types are designed. The coordinate performance of the composite structure of steel beam and PEC column is studied by application of repeated low-cycle horizontal loads, and the effect of end plate thickness, angle steel setting, bolt spacing and other factors on the anti-seismic performance of the whole frame is analyzed. The test results show that the yield mechanism of the composite structure conforms to the anti-seismic design requirements for "strong column and weak beam", and the top flange of the beam deforms seriously and forms plastic hinge, and the root of the column bends into plasticity. Increasing the thickness of the end plate and reducing the bolt spacing can increase the rotational ductility, increase the bearing limit, and improve the initial stiffness. The ductility of each frame is good, the displacement ductility coefficient is greater than 2.6, and the ductility of the frame connected by end plate is higher than that connected by angle steel. The value of the equivalent viscous damping coefficient h_e ranges from 0.84 to 1.14, and the anti-seismic performance of each frame is good.

Keywords: steel beam; composite structure; PEC column; anti-seismic performance

0 引言

传统的框架节点在理论分析时,一般设计成理想铰接或完全刚性^[1]。而大量的试验证明,梁柱节点并不存在上述两类假定情况,而是介于两者之间的半刚性连接状态。工程中常见的半刚性连接类型有梁柱采用焊缝或螺栓通过端板、L型角钢、T型钢等连接。Chicoine等^[2]和Tremblay等^[3]开展了对

PEC柱抗震性能的加载试验,考虑了系杆间距、混凝土强度、翼缘宽厚比、纵向钢筋等关键参数对PEC柱受力性能的影响,结果表明:提高混凝土强度和缩小系杆间距可以使PEC柱承载极限提高很多;翼缘宽厚比越小,PEC柱的延性越好。赵桥荣等^[4]开展了对三根型钢外包混凝土梁试验分析,建立了ANSYS设计模型,提出了相关经验公式,研究了屈服机制、破坏模式和传力机理。赵根田等^[5]开

收稿日期:2019-05-21

基金项目:院级科研自然重点项目:部分包裹混凝土柱与钢梁组合结构的抗震性能研究(dtpt2019NK002)。

作者简介:冯超(1984—),男,山东枣庄人,讲师,硕士,研究方向:建筑结构、土木工程、工程造价。

展了对PEC复合柱及连接节点受力性能的研究,探讨了影响抗震性能的因素,分析了其受力机理和变形模式。但上述对钢梁与PEC柱组合框架的受力性能及各因素影响程度的研究较少,缺乏此类组合结构的试验分析和理论研究。本文对钢梁与PEC柱半刚性连接组合结构进行研究,通过对4榀不同连接类型的整体框架施加低周水平反复荷载,考虑端板厚度、角钢设置、螺栓间距等因素对PEC柱与钢梁组合结构抗震性能的影响程度,研究钢梁与PEC柱组合结构在地震区的协同工作性能,为工程设计提供安全可靠的依据。

1 试验研究

1.1 试件设计

根据国内外研究状况,本试验共设计了4榀缩尺比例为1:3的钢梁与PEC柱组合框架试件,编号分别为KJ1, KJ2, KJ3, KJ4,设计简图如图1所示。

梁采用是热轧H型钢,长度为1.8 m,截面尺寸为200 mm×100 mm×5.5 mm×8 mm。

柱子采用是PEC柱,柱高1.2 m,截面规格为200 mm×200 mm×8 mm×12 mm。其中,腹板与两翼缘通过焊缝连接,翼缘之间焊接直径为8 mm,间距为100 mm,强度为HPB300的横向系杆且填筑强度等级为C30的混凝土,截面形式见图2。

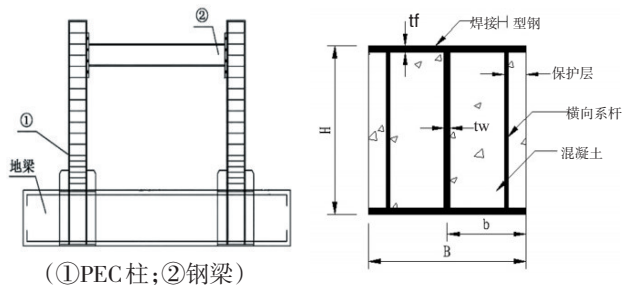


图1 组合框架设计简图

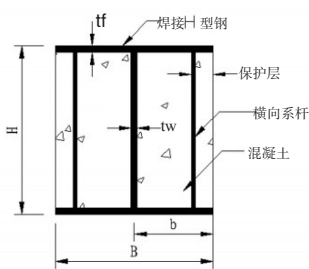


图2 PEC柱截面形式

框架中钢梁—PEC柱节点通过顶底角钢或外伸端板连接,角钢规格为L200 mm×200 mm×18 mm,端板规格为400 mm×180 mm。为防止组合框架在加载过程中产生位移,将钢筋混凝土条形基础梁通过8根地脚螺栓固定在地面上,两端设置水平

表1 钢材力学性能指标

钢材	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性模量 /MPa	强屈比
横向系杆	309	441	1.61×10^5	1.43
8 mm厚钢板	323	456	1.68×10^5	1.42
12 mm厚钢板	346	460	1.71×10^5	1.33
20 mm厚钢板	330	487	1.73×10^5	1.48

限位梁。其中,基础梁长度为3 600 mm,截面尺寸为600 mm×500 mm。钢材的力学性能实测值如表1所示,试验主要设计参数见表2。

表2 试件设计参数

试件	梁截面尺寸	柱截面尺寸	端板厚度	角钢尺寸	螺栓间距
KJ1	200×200×5.5×8	200×200×8×12	12		
KJ2	200×200×5.5×8	200×200×8×12	20		
KJ3	200×200×5.5×8	200×200×8×12		200×200×18	70
KJ4	200×200×5.5×8	200×200×8×12		200×200×18	85

1.2 加载装置及加载制度

根据国内外抗震试验加载方法,结合铜陵市一建试验室的加载设备及现有条件,拟采用P-Δ混合控制方法对组合结构施加低周反复水平荷载^[6-8]。推拉千斤顶在水平方向施加循环荷载,其两端分别与框架试件、反力墙铰接。竖向千斤顶在柱顶施加轴压力,保证柱端处于稳定的竖向荷载作用状态。加载装置见图3。

按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015),钢梁与PEC柱组合结构加载初期采用荷载控制,每级循环1次,荷载增量为20 kN,组合结构滞回性能良好。当P-Δ曲线出现拐点,荷载开始变得不稳定时,启用位移控制,每级循环3次,位移增量 $0.25\Delta y^{[9]}$ 。为了更准确的分析组合结构破坏模式和受力机理,直到框架试件出现局部失稳或荷载下降到极限荷载85%时方可停止试验^[10],加载制度见图4。

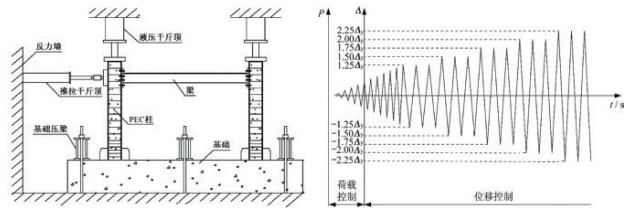


图3 试验加载装置图

图4 试验加载制度图

2 试验现象

2.1 试件KJ1的破坏现象

从试验设备采集的数据可以看出,当水平力在未达到374.58 kN之前,结构基本处于弹性阶段,各构件基本没有变形。继续加载至374.58 kN推第一次时,P-Δ曲线出现明显拐点,组合结构开始进入屈服阶段,从采集的应变片数据可以看到相对应的 Δy 为16.14 mm。在位移控制 $2\Delta y$ 推第二次时,梁顶翼缘开始产生鼓曲,节点区域柱内混凝土出现横裂缝^[11]。在 $2.25\Delta y$ 拉第二次时,连接角焊缝出现细微裂纹,加载端PEC柱翼缘与混凝土有脱开趋势。在 $3\Delta y$ 推2次时,梁底翼缘发生鼓曲,PEC柱翼缘内侧

混凝土裂缝继续向腹板方向和垂直方向深度扩展,核心区混凝土开始出现脱落现象。3.25 Δy 拉第2次时,端板开始出现鼓曲变形,附近连接角焊缝局部开裂。最终,PEC柱根部产生变形,靠近加载端及柱脚附近的混凝土脱落,梁翼缘及腹板出现断裂,框架整体破坏形态如图5所示。

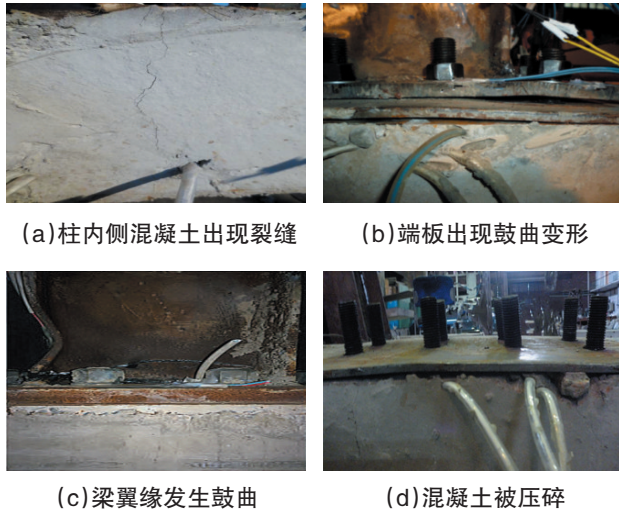


图5 试件KJ1破坏形态

2.2 试件KJ2的破坏现象

框架加载初期,梁柱各构件处于良好的弹性阶段,没有明显变化。在280KN推第一次时,PEC柱脚处混凝土出现微裂缝。当水平力增至387.96 KN时,数据采集仪显示P- Δ 曲线斜率开始下降,组合框架进入屈服阶段,对应屈服位移为15.92 mm。在 Δy 推第一次时,梁底翼缘出现鼓曲,随后相连接的腹板也产生屈曲。在2.5 Δy 拉第二次时,梁顶翼缘和端腹板开始屈曲,端板变形较大,PEC柱翼缘与混凝土产生裂缝。在3 Δy 推第三次时,连接角焊缝出现微裂缝,PEC柱内混凝土裂缝向纵深发展并伴随

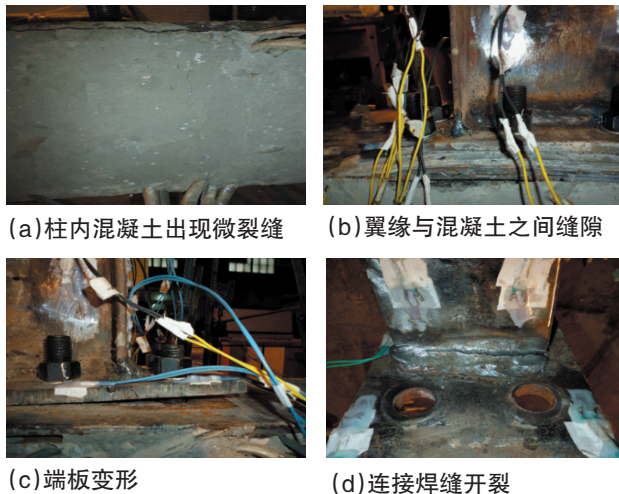


图6 试件KJ2破坏形态

局部脱落,梁顶翼缘与端板之间的焊缝被拉断。在3.5 Δy 拉第三次时,腹板与端板区域出现裂缝,PEC柱脚出现鼓曲现象。结构破坏现象如图6所示。

2.3 试件KJ3的破坏现象

随荷载增加到365.51 kN推第一次时,组合结构进入屈服阶段,但变形不明显,柱翼缘与核心区混凝土之间出现横向和竖向微裂缝。在1.5 Δy 推第一次时,PEC柱两侧柱脚发生鼓曲,梁端与柱翼缘之间的缝隙越来越大,靠近加载端混凝土裂缝的长度和宽度也不断增大。在2.5 Δy 推第一次时,梁端腹板鼓曲,梁翼缘与角钢连接区域出现鼓曲变形,凸起中心离柱壁已有3 mm距离。2.75 Δy 推第一次时,角钢根部出现一条微裂纹,PEC柱脚鼓曲严重,附近混凝土有局部被压碎。3 Δy 拉第一次时,梁顶翼缘端部变形严重,角钢裂缝深度扩展随之贯通。最后,荷载急剧下降,角钢断裂,停止试验。试件的破坏现象如图7所示。

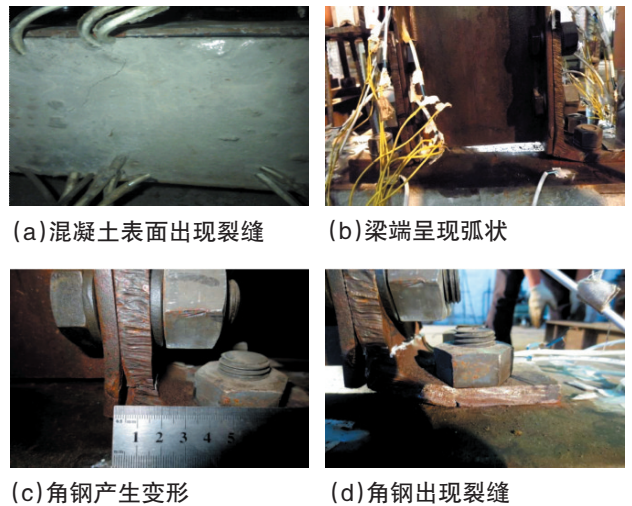


图7 试件KJ3破坏形态

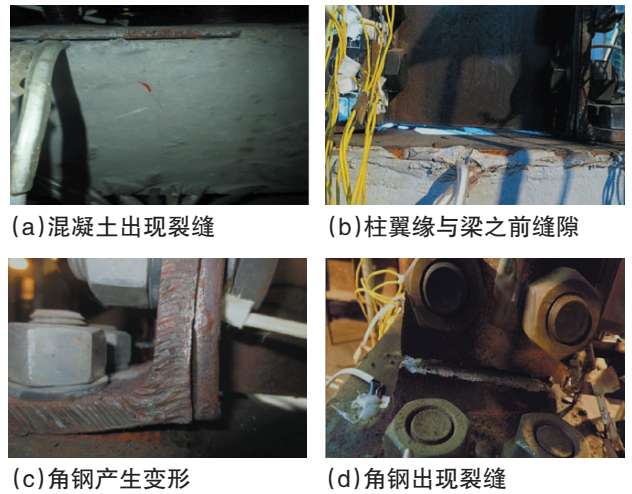


图8 试件KJ4破坏形态

2.4 试件KJ4的破坏现象

随荷载增加到343.89 kN推第一次时,数据采集仪显示框架的 P - Δ 曲线出现明显拐点,组合结构此时进入屈服阶段,此时PEC柱翼缘内混凝土之间出现微裂缝。在 $1.5\Delta_y$ 拉第一次时,梁翼缘与角钢连接处出现鼓曲,PEC柱根部混凝土表面有微裂缝。在 $1.75\Delta_y$ 拉第三次时,加载端梁顶翼缘出现局部鼓曲,随后腹板屈曲,PEC柱翼缘与混凝土缝隙达2-3 mm。在 $2\Delta_y$ 推第一次时,角钢产生不可恢复的变形,与PEC柱翼缘间出现明显空隙。在 2.75Δ 推第三次时,梁翼缘鼓曲变性较大,角钢出现裂纹,PEC柱脚翼缘屈曲,混凝土局部脱落。试件的破坏现象如图8所示。

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

根据数据采集仪可以得到4榀组合框架的 P - Δ 曲线,具体见图9。不难看出,各试件的滞回曲线呈比较饱满的梭形,弹塑性位移较大,反映了钢梁与PEC柱组合结构滞回性能良好,抗震性能较好。比对4个试件可知,试件1和试件2的包络线面积较大,耗能能力较强;在加载后期,试件3和试件4滞回曲线拉压不对称现象比较明显,主要是因为反复水平荷载作用使得钢材产生塑性变形,出现包辛格效应。

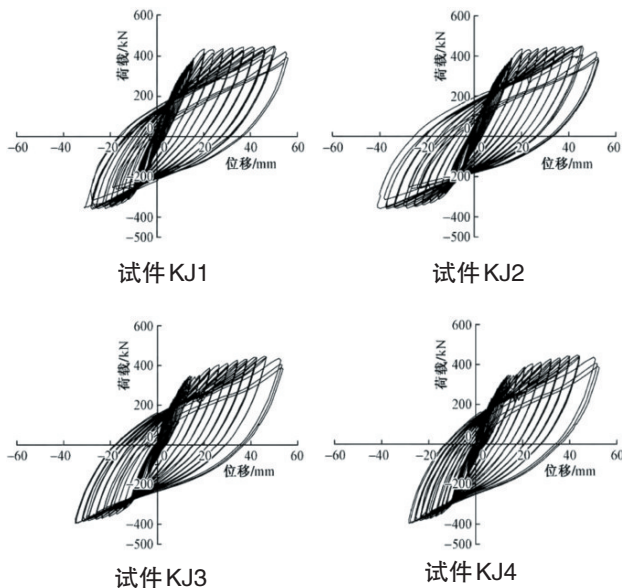


图9 试件 P - Δ 滞回曲线

3.2 骨架曲线

从框架骨架曲线见图10。端板厚度和螺栓间距对组合结构承载力有较大的影响。在荷载加载前期,骨架曲线随着承载力的增加而增大,4榀框架试件的 P - Δ 曲线呈线性,且KJ2的曲线斜率大于

KJ1。到达极限荷载以后,结构进入塑性,变形增大;随着位移增大,组合结构承载力下降,骨架曲线开始变陡^[12]。比对4个试件可知:增加端板的厚度,KJ2的极限承载力比KJ1提高了5.5%;KJ3、KJ4的极限荷载分别为:455.17 kN,439.63 kN,减小角钢螺栓边距可明显改善钢梁与PEC柱组合结构的承载力。

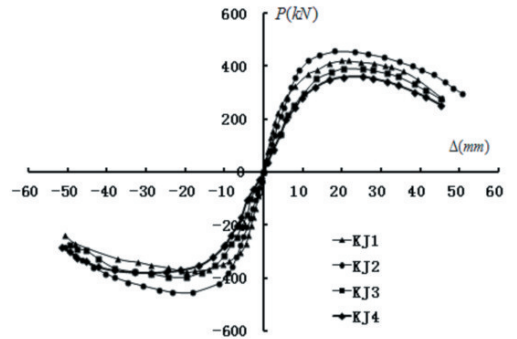


图10 结构骨架曲线对比

3.2 承载力退化

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015),可以得到组合框架承载力退化系数在0.95~0.97之间,结构承载力退化比较稳定,曲线下降趋势相对平缓。在位移控制后期,KJ1、KJ2、KJ3的承载力略有降低,但KJ4承载力退化突然加大,主要原因是由于螺栓间距的变大,翼缘间混凝土裂缝纵深发展,加剧了承载力的退化,梁柱发生屈曲形成塑性铰,靠近加载端及PEC柱根部的混凝土局部被压碎,侧移值增大,见图11。

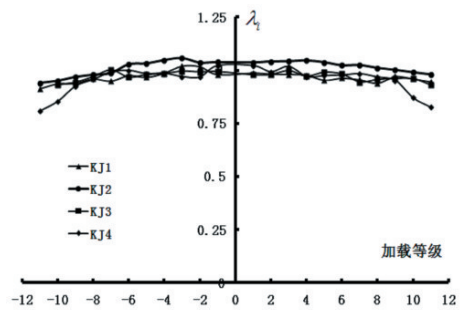


图11 结构承载力退化系数

3.3 刚度退化

根据组合框架在反复荷载作用下的 P_{max} 和 Δ_{max} ,计算4榀整体框架的割线刚度^[13]见图12,具体数值见表3。当荷载达到屈服荷载时,所有框架经过每一级循环加载,刚度的退化斜率都较大,靠近加载端梁翼缘屈服并发生鼓曲。达到极限荷载后,由于钢梁端部和PEC柱根逐渐进入塑性,所以组合结构的刚度退化速度比较均匀。从图12中不难看出,4个组合框架的初始刚度从大到小的排序为KJ2 > KJ1 > KJ3 > KJ4,端板连接的组合结构初始刚度明

显大于角钢连接,同时也说明增加端板厚度及减少螺栓间距可以起到提高组合结构初始刚度的效果。

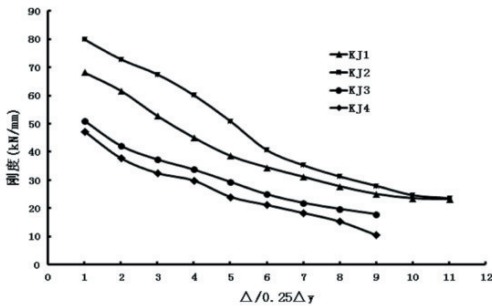


图12 结构刚度退化图

3.4 延性分析

通过公式1计算,可以得到各榀框架的延性系数,具体结果见表3。4榀整体框架的位移延性系数均大于2.6,KJ1,KJ2,KJ3,KJ4延性系数分别为2.98、3.27、2.79、2.60,端板连接的组合结构延性明显高于角钢连接,说明钢梁与PEC柱半刚性连接组合结构均具有良好的延性性能。通过对数据进行分析,螺栓间距由85 mm减小到70 mm时,框架延性系数提高了7.3%,端板的厚度由12 mm增大到20 mm时,框架的延性系数提高了9.7%,说明增加端板厚度和减小螺栓间距可以有效提高组合结构的整体延性。

$$\mu = \Delta\mu/\Delta y \tag{1}$$

表3 结构的延性系数

试件编号	Py	Δy	Pmax	Δmax	Pu	Δu	μ
KJ1	374.58	16.14	451.49	41.54	380.17	48.16	2.98
KJ2	387.96	15.92	476.26	40.17	398.18	52.05	3.27
KJ3	365.51	17.83	455.17	43.35	365.31	49.81	2.79
KJ4	343.89	18.14	439.63	42.74	336.83	47.12	2.60

3.5 耗能能力

建筑结构的耗能能力通常采用等效粘滞阻尼系数 h_e 表示^[14](式2),整体框架的分析计算结果见表4,计算示意图见图4。当组合结构进入塑性变形以后,随循环次数增加,裂缝不断发展,塑性铰陆续形成,框架吸收的能量逐渐增加,等效粘滞阻尼系数不断增大^[15]。分析可知,本试验框架试件 h_e 的数值分布在0.84~1.14,明显高于钢筋混凝土结构等效粘滞阻尼系数0.1,说明焊接H型钢PEC柱与型钢梁半刚性连接组合框架耗能性能较好。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} * \frac{\text{包络线面积 } S_{(EBF+EDF)}}{\text{三角形面积 } S_{(ABO+CDO)}} \tag{2}$$

参考文献:

[1] 彭福明. 钢结构框架梁柱节点性能研究[D]. 青岛: 青岛建筑工程学院, 2001.

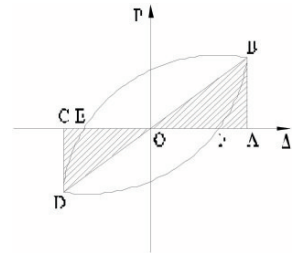


图13 h_e 计算示意图

表4 耗能指标表

序号	h_e			
	试件一	试件二	试件三	试件四
1	0.84	0.85	0.85	0.85
2	0.86	0.88	0.87	0.86
3	0.87	0.90	0.89	0.88
4	0.89	0.92	0.90	0.90
5	0.92	0.95	0.92	0.91
6	0.94	0.97	0.95	0.94
7	0.96	0.98	0.97	0.96
8	0.97	1.10	0.99	0.97
9	0.98	1.11	1.10	0.98
10	0.99	1.12	1.11	1.10
11	1.00	1.14	1.12	1.11

4 结论

通过对4榀钢梁与PEC柱半刚性连接整体框架进行加载试验,研究了组合结构的协同工作性能,分析了端板厚度、角钢设置、螺栓间距等因素对PEC柱与钢梁组合结构抗震性能的影响程度,得出以下结论:

(1)钢梁与PEC柱半刚性连接组合框架破坏特征为:节点核心区混凝土出现裂缝,梁顶翼缘端部变形严重形成明显塑性铰,柱根部鼓曲进入塑性,混凝土被压碎脱落。

(2)减小螺栓间距和增加端板厚度都可起到增大转动延性、提高承载极限、改善初始刚度的效果。

(3)通过试验测得各框架的滞回性能良好,位移延性系数均大于2.6,且端板连接的框架延性高于角钢连接的框架,说明钢梁与PEC柱组合结构的抗震延性较好。

(4)组合框架的等效粘滞阻尼系数 h_e 的数值在0.84~1.14之间,高于钢筋混凝土结构等效粘滞阻尼系数0.1,说明钢梁与PEC柱半刚性连接组合结构抗震性能良好。

- [2] TREMBLAY R, CHICOINE T, MASSICOTTE B, et al. Compressive strength of large scale partially-encased composite stub columns[J]. In: 2000 Annual Technical Session, and Meeting, Structural Stability Research Council, 2000:262-271.
- [3] CHICOINE T, TREMBLAY R, MASSICOTTE B, et al. Journal of Structural Engineering[J], ASCE, 2002, 128(3):279-285.
- [4] 赵桥荣, 郝际平. 外包型钢混凝土梁性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [5] 赵根田, 冯超, 杨进宏. 部分包裹混凝土偏心受压柱的受力性能研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2012, 31(1):90-94.
- [6] 魏威, 叶燕华, 王滋军, 等. 新型钢筋混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 混凝土, 2011(6):15-18.
- [7] 张建伟, 吴蒙捷, 曹万林, 等. 斜筋对大洞口率单排配筋双肢墙的抗震性能影响研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(S2):20-25.
- [8] 陈元龙. 焊接箍筋网多重配筋混凝土柱力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [9] 龚永智, 张继文, 蒋丽忠, 等. 高性能CFRP筋混凝土柱的抗震性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4):1506-1513.
- [10] 赵根田, 王聊杨, 冯超. 薄柔H形钢部分包裹混凝土梁柱组合体抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(S1):96-101.
- [11] 裘哲俊. 装配式型钢混凝土柱—钢梁框架节点抗震性能研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
- [12] 孙苍柏. 钢骨高强混凝土柱抗震性能的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [13] 赵根田, 鉴钟. 冷弯薄壁C型钢框架体系抗震性能研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2013, 32(1):88-92.
- [14] 袁书强, 陈适才, 田岳, 等. 扭弯比对SRC柱抗震性能影响的试验研究与分析[J]. 工程力学, 2018, 35(3):167-177.
- [15] 赵根田, 冯超, 王聊杨. 部分包裹混凝土柱与型钢梁连接节点的抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(4):111-115+130.

(责任编辑: 曲继鹏)

(上接第11页)

参考文献:

- [1] 赵剑闯, 周勃. 乳酸菌对肉鸡生长性能、死亡率和屠宰率的影响[J]. 微生物制剂应用与技术, 2013(1):47-49.
- [2] 蒋磊, 刘敏. 817肉鸡肠道乳酸菌及生理特性研究[J]. 畜禽业, 2019(3):6-9.
- [3] 周珍辉, 向双云, 关文怡, 等. 禽源乳酸菌饲喂肉鸡试验[J]. 饲料研究, 2017(19):1-4.
- [4] 徐子涵, 徐丽. 不同剂型乳酸菌对雏鸡生长性能和小肠黏膜形态的影响[J]. 动物营养学报, 2011, 23(10):1812-1818.
- [5] 崔一喆, 蒋再慧, 周亚强, 等. 鸡源抑菌性乳酸菌的特性研究与鉴定及饲喂肉仔鸡的效果研究[J]. 中国微生物学杂志, 2016(28):206-511.
- [6] 孙玉章, 衣服德, 乔昌明, 等. 乳酸菌复合制剂对肉鸡生产性能的影响[J]. 动物医学进展, 2015, 36(5):44-47.
- [7] 陈桂香, 银梅, 任静强, 等. 乳酸菌制剂饲养肉鸡试验效果[J]. 河南科技学院学报, 2010(38):40-43.
- [8] 徐基利. 不同乳酸菌及其添加量对肉仔鸡生长性能、盲肠菌群和免疫功能的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- [9] 刘凤美, 张磊, 黄彬. 日粮添加益生菌对肉鸡生产性能、免疫功能和肠道菌群的影响[J]. 中国饲料, 2018(24):39-43.
- [10] 高林. 复合微生物制剂对肉雏鸡免疫器官指数、肠道菌群和死亡率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(6):747-750.
- [11] 王欣, 赵巍, 甄玉国. 不同来源乳酸菌的筛选及其抑菌效果比较[J]. 食品科技, 2014(39):22-26.
- [12] 唐志刚, 王俊峰, 温超, 等. 益生菌对肉鸡生产性能、免疫器官指数和血清指标的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(4):208-210.
- [13] 张菊, 张志焱, 李金敏, 等. 微生物制剂与饲用抗生素对肉鸡生产性能和免疫功能的影响[J]. 家畜生态学报, 2012, 33(1):56-60.
- [14] 付丽, 赵巍, 李丽佳, 等. 乳酸菌培养物对肉鸡生长性能及免疫功能的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2015, 42(9):2337-2344.
- [15] 尹艳军, 郝廷刚. 冻干乳酸菌对肉鸡生长性能和免疫功能的影响[J]. 饲料工业, 2015, 36(10):36-40.
- [16] 郭欣怡, 张曼, 韩飞. 不同益生菌制剂对肉鸡生产性能、免疫功能和肠道菌群的影响[J]. 家畜生态学报, 2016, 37(11):79-83.

(责任编辑: 蒋召雪)