

翼缘卷边蜂窝开孔PEC梁抗震性能研究

楼汉忠¹, 杨克家^{2*}, 李杰³, 蒋路⁴, 陆天宇¹, 杨宇焜^{4,5}

(1. 浙江理工大学 建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 台州学院 建筑工程学院, 浙江台州 318000;
3. 上海杉达学院 工程学院, 上海 201259; 4. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 200126;
5. 上海结奕建筑咨询事务所, 上海 202150)

摘要: 针对PEC梁力学性能及施工过程中的薄弱点, 本文提出了将PEC梁翼缘卷边并在腹板开设蜂窝孔的构造。考虑剪跨比与箍筋间距因素的影响, 对3根不同剪跨比与箍筋间距的翼缘卷边蜂窝开孔PEC梁进行了拟静力试验。观察了试件不同加载阶段的破坏特征以及荷载-位移曲线, 根据试验数据分析试件的各项力学性能指标。试验结果表明: 翼缘卷边蜂窝开孔PEC梁具有较好的承载能力与延性, 破坏模式是根部混凝土开裂压溃和翼缘卷边屈曲撕裂; 剪跨比主要影响试件的承载力、刚度退化, 箍筋间距主要影响耗能能力, 两者对裂缝发展都有较大影响。

关键词: PEC梁; 拟静力试验; 蜂窝开孔; 翼缘卷边; 抗震性能; 剪跨比; 箍筋间距

中图分类号: TU398⁺.9; TU352.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)12-0051-11

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240628001

Study on Seismic Performance of PEC Beams with Lipped Flanges and Honeycombed Openings

LOU Hanzhong¹, YANG Kejia^{2*}, LI Jie³, JIANG Lu⁴, LU Tianyu¹, YANG Yukun^{4,5}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou 318000, China; 3. School of Engineering, Sanda University, Shanghai 201259, China; 4. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200126, China; 5. Shanghai Jieyi Architectural Consulting Firm, Shanghai 202150, China)

*Corresponding author: yangkejia@tzc.edu.cn

Abstract: The construction details were proposed to address the weaknesses in mechanical and construction performance of PEC beams by using lipped flanges and webs with honeycombed openings. Taking into account the influence of shear-span ratio and stirrup spacing, quasi-static tests were conducted on three PEC beams with varying shear-span ratios and spacings between stirrups. The failure characteristics and load-displacement curves of the specimens in different loading stages were observed, and the mechanical properties of specimens were analyzed based on the experimental data. The experimental results show that the castellated PEC beams with lipped flanges have good bearing capacity and ductility, and the failure modes are concrete cracking and crushing at the root and flange edge buckling and tearing. The shear-span ratio mainly affects the bearing capacity and stiffness degradation of the specimen, while the spacing between stirrups mainly affects the energy dissipation capacity. Both parameters have a significant impact on crack development.

收稿日期: 2024-06-28

作者简介:

楼汉忠(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事组合结构与结构抗震方面的研究。E-mail: 2856047201@qq.com。

通信作者:

杨克家(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事PEC结构及纤维混凝土方面的研究。E-mail: yangkejia@tzc.edu.cn。

Keywords: PEC beam; quasi-static test; honeycombed opening; lipped flange; seismic performance; shear-span ratio; spacing between stirrups

部分包覆钢-混凝土组合(Partially Encased Composite, PEC)构件是通过在型钢翼缘两侧填充混凝土,并设置相应的上下翼缘拉结筋形成的组合构件(图1)。由于PEC构件与型钢混凝土构件相比更易施工、具有更好的装配性能,与钢构件相比具有更好的耐火^[1-2]与耐腐蚀性能,可提高经济性,因而在国家大力推广装配式建筑的背景下PEC结构得到了较好的发展和应用。

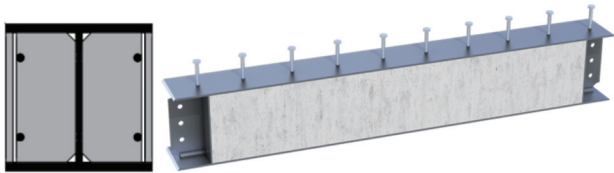


图1 普通PEC梁

Fig. 1 Ordinary PEC beam

PEC构件最早于20世纪70年代在欧洲出现,KINDMANN等^[3]对PEC梁进行了静力受弯试验,认为混凝土仅用于约束钢梁翼缘屈曲,不考虑其受压对梁承载力贡献的计算方法偏保守。NAKAMURA等^[4]对PEC梁进行了试验研究,与纯钢梁相比,PEC梁的受弯、受剪承载力分别约是纯钢梁受弯、受剪承载力的2.08倍、2.98倍。KHARE等^[5]研究了箍筋间距等对PEC梁受力性能的影响,并提出了新的设计方法来评估PEC梁的受弯、受剪能力,结果表明PEC梁的延性系数和抗震性能较传统的钢-混凝土组合梁更好。赵根田等^[6]研究了端板厚度、加劲板、背垫板对梁柱组合体系抗震性能的影响,结果表明,增加端板厚度和考虑设置背垫板,组合体系的承载力提高,端板厚度及设置背垫板对组合体系的刚度影响很大。李炜等^[7]对配置X系杆的PEC梁进行了纯弯滞回与剪弯滞回试验,发现PEC梁的承载力与采用边缘屈服准则及全截面塑性准则计算得到的承载力理论值较为接近。伍凯等^[8]研究了剪跨比、混凝土厚度、设置拉螺栓替代横向系杆对PEC梁承载能力与变形能力的影响,并提出了该类PEC组合梁的受剪承载力计算公式与全截面塑性状态下的受弯承载力计算方法,提出了三折线模型、 V_m - M_m 相关曲线。张广武等^[9]通过对4个型钢部分包裹混凝土试件进行推出试验,分析了界面埋置长度、混凝土强度对其黏结性能的影响,得出其黏结滑移曲线。陈以一等^[10]对PEC构件钢翼缘板受压条件下的局部稳定性进行了研究,推导了弹性与弹塑性失稳条件下的临界应力与翼缘宽厚比。李亚明等^[11]研究了受

拉侧混凝土对局部半包裹PEC梁受弯性能的影响,试验表明该梁挠度达到 $l_0/50$ 时截面抗弯承载力并未下降,具有良好的延性。龚树红等^[12]研究了4根PEC梁和钢-混凝土组合梁在负弯矩作用下的受力性能和刚度计算方法,结果表明PEC梁的受弯承载力与刚度相较钢-混凝土组合梁分别提高40%和25%。

为进一步提高PEC结构的经济性,在梁腹板上开设蜂窝孔成为新的发展方向。蜂窝式H型钢的设计标准早先在英国钢结构规范^[13]中提出,后与PEC梁结合形成蜂窝组合梁。武岳等^[14]通过有限元分析软件分析得到六边形蜂窝梁开孔率在65%~75%之间时性能较好。徐德新^[15]通过同型号工字钢的蜂窝组合梁与PEC组合梁的破坏试验,发现蜂窝式组合梁的承载力要高于PEC组合梁的承载力。贾连光等^[16-17]利用有限元软件建立模型并进行分析,发现开孔形式中圆形孔的蜂窝梁的抗震性能最佳,六边形孔次之,矩形孔较差;将不同翼缘宽度、厚度以及开孔率的蜂窝梁与蜂窝组合梁进行比较,结果表明,蜂窝梁翼缘厚度变化对其抗剪性能影响较大,而蜂窝组合梁中翼缘厚度的变化对其抗剪性能影响相对较小;混凝土板提高了蜂窝梁的抗剪极限承载力。赵必大等^[18]对两个蜂窝梁和两个PEC梁进行静力加载试验,结果表明主钢件腹板开孔后,可以扩大截面高度,在用钢量接近的情况下,能够有效提高组合梁的受弯承载力。邹传仁等^[19]研究了主钢件腹板开孔对PEC梁受弯性能、抗震性能的影响,结果表明对比钢腹板未开孔的PEC梁,六边形开孔与圆形开孔的PEC梁的抗弯承载力分别降低了15%、7%,圆形开孔的PEC梁延性降低较小。

目前使用的PEC构件存在一些不足,PEC构件中型钢对腹板两侧混凝土的约束较弱,在构件变形较大时混凝土容易脱落从而丧失与型钢的协同受力性能;另外,其翼缘外侧无约束,虽然上下翼缘之间有构造拉结筋连接,但拉结筋对翼缘约束不连续,因而《部分包覆钢-混凝土组合结构技术规程》(T/CECS 719—2020)对PEC构件的板件宽厚比提出的限值较为严格,经济性偏低。

综合上述研究成果,本文提出采用冷弯工艺使翼缘产生C形卷边来提高翼缘稳定性并增强型钢对混凝土的约束,同时在腹板开设蜂窝孔以形成翼缘卷边蜂窝开孔PEC梁构件,并通过低周往复荷载试验研究了箍筋间距及翼缘厚度对其抗震性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本文设计了3个翼缘卷边蜂窝开孔PEC梁试件,试件主钢件及腹板均采用Q235钢,混凝土强度为C30,腹部纵向横向钢筋强度等级均为HRB400,纵筋间距为200 mm,对腹板进行正六边形蜂窝开孔,孔洞边距为236 mm,蜂窝孔两侧采用C形拉结筋连接,使梁体两侧

型钢翼缘产生卷边,卷边伸出长度为60 mm,翼缘及卷边厚度均为6 mm,腹板厚度为5 mm,封端板尺寸为600 mm×250 mm,厚30 mm,开孔率均为34.7%。本试验变量参数为剪跨比和箍筋间距,试件编号及主要设计参数见表1,组合梁整体构造详图见图2。试件编号中第一个数字为较小的箍筋间距,第二个数字为剪跨比。

表1 试件编号及设计参数

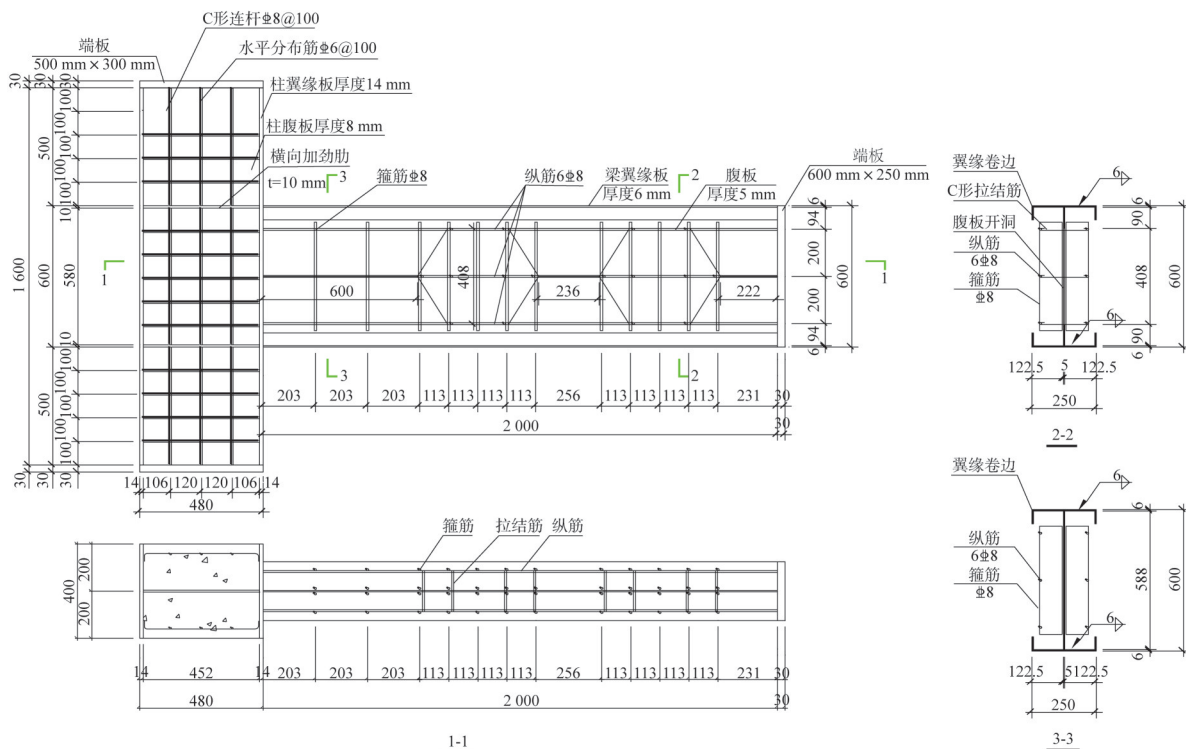
Table 1 Numbering and design parameters of specimens

试件编号	梁长/mm	箍筋	箍筋间距/mm	纵筋	剪跨比	抗弯承载力/(kN·m)	抗剪承载力/kN	最大推力/kN
L-113-3	2 000	Φ8	113/203	6Φ8	3	398.64	367.50	227.79
L-113-2	1 400	Φ8	113/203	6Φ8	2	398.64	367.50	346.64
L-250-3	2 000	Φ8	250	6Φ8	3	398.64	367.50	227.79

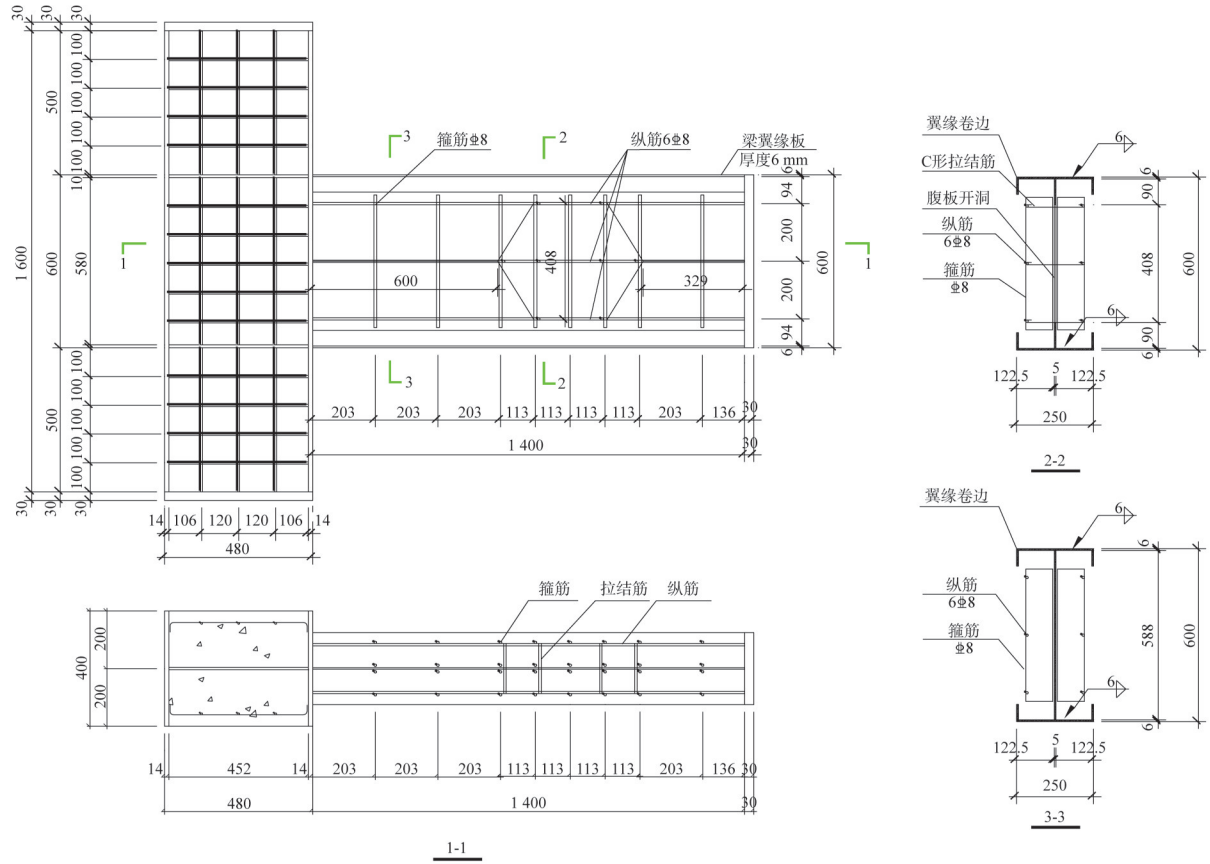
试件加工时,采用切割的方式先在腹板上进行蜂窝开孔,再与翼缘焊接。混凝土分正反两面两次进行浇筑,无须支模,待一侧混凝土凝固成型后翻面浇筑,并严格控制每次振捣时间基本一致以减小混凝土的离散性。浇筑振捣密实后12 h内对试件覆盖塑料薄膜,初凝前再压平收面,以免产生表面裂缝。混凝土采用自然养护,前三天白天每3 h洒水1次,晚上2次;之后每天洒水3次,持续7天。7天后构件达到运输要求,装车运送至结构实验室继续养护。

1.2 材料性能

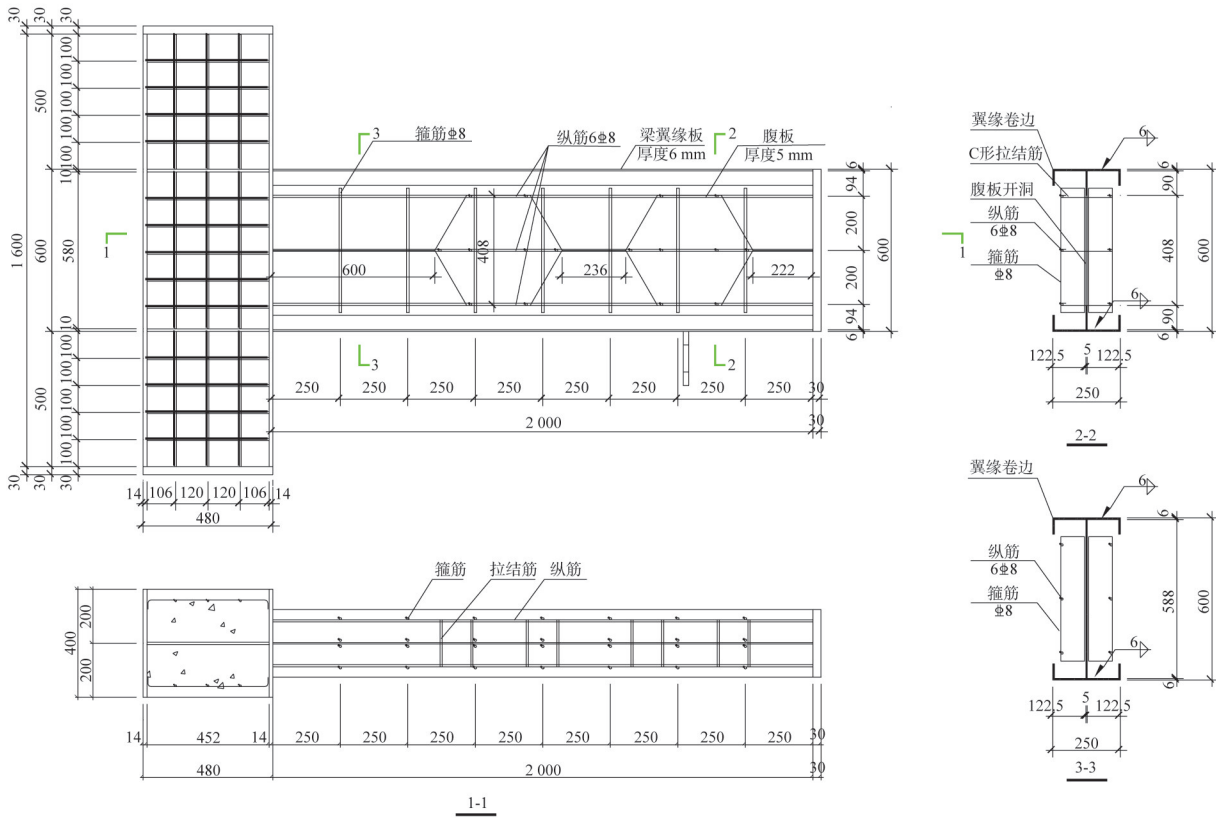
混凝土材性试验根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)的规定,制作标准立方体试块,鉴于试件混凝土分两次浇筑,预留了两批混凝土试块,试块与PEC梁同条件养护28 d后进行立方体抗压强度试验,立方体抗压强度标准值为31.5 MPa,弹性模量为 3.10×10^4 MPa。钢材材性试验依据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)中规定的试验方法进行,得到钢板与钢筋的材性试验结果见表2。



a) 试件L-113-3



b) 试件L-113-2



c) 试件L-250-3

图2 试件构造详图(单位:mm)

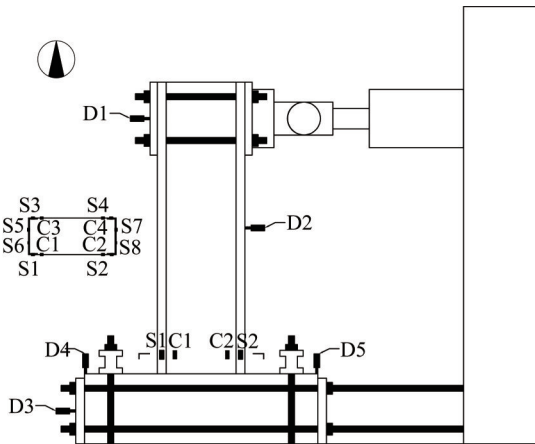
Fig. 2 Construction details of specimens (unit: mm)

表 2 钢材力学性能
Table 2 Mechanical properties of steel

取样位置	板厚(直径) $t(d)$ /mm	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /MPa
梁腹板	5	304.3	423.7	209 678
梁翼缘	6	298.7	440.9	208 457
柱腹板	8	273.9	409.7	206 893
柱翼缘	14	238.7	364.5	203 539
柱纵筋	6	476.0	600.7	214 068
梁箍筋	8	409.5	564.4	211 557

1.3 加载装置与测点布置

如图 3 所示,加载装置由反力台座、反力墙、作动器和压梁等组成,由于结构实验室设备条件限制,试件竖向放置,考虑到梁构件实际工作中轴力很小,故抗震试验竖向(梁构件轴向)不施加轴力,仅通过横向作动器施加水平荷载,加载点位于 PEC 梁端位置,柱端用压梁向下固定,左右侧用夹板与反力墙相连,防止试验过程中出现较大的移动。



a) 加载装置及测点布置图



b) 加载现场图

图 3 加载装置

Fig. 3 Loading setup

加载装置及测点布置如图 3a)所示,其中,D1~D3为水平布置位移计,D4~D5为竖向布置位移计。D1用于测量梁端位移,D2用于测量梁跨中位移,D3用于测量试

件底座与地面的相对滑移;D4、D5用于测量试件底座的变形;S1~S8用于测量钢翼缘的应变,C1~C4用于测量混凝土的应变。

1.4 加载制度

本次试验加载制度依据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101—2015)采用荷载-位移混合控制方式进行低周往复加载。在加载前,先进行预加载,荷载取预估屈服荷载的 5%。在荷载控制阶段,预估屈服荷载为 P ,分为五个荷载级进行加载: $0.2P$ 、 $0.4P$ 、 $0.6P$ 、 $0.8P$ 、 P 、 $0.2P$ 为 38 kN(L-113-2号试件为 56kN)。每级递增且往复一次,荷载加载到 P 级时根据根部钢翼缘的应变选择位移控制的加载方式,直至型钢屈服;在位移控制阶段,荷载达到屈服荷载时钢梁两端的水平位移为 Δ ,按照 Δ 、 1.5Δ 、 2Δ 、 2.5Δ 、 3Δ ……进行加载,每级位移加载循环往复三次,直至试件完全破坏或承载力下降至极限荷载的 85% 为止。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象描述

为便于描述,规定以作动器推出为正向,拉回为负向。图 4 是各试件裂缝分布情况及破坏形态。

1) 试件 L-113-3

对于 L-113-3 试件,当加载至 +76.0 kN 时,试件南面根部出现了三条水平裂缝,北面根部出现了两条水平裂缝;当加载至 -76.0 kN 时,试件南面根部出现了八条水平裂缝和一条斜向裂缝,北面根部出现了三条水平裂缝和一条斜向裂缝。随着荷载增加,试件跨中不断出现新的水平裂缝和斜向裂缝,且裂缝逐渐延伸加宽,其中以水平裂缝居多;当加载至 +266.0 kN 时,翼缘根部应变测点处发生屈服且荷载-位移曲线开始弯曲,将该荷载下的位移 24.11 mm 作为屈服位移。当加载至 60.28 mm 时,试件北面东侧根部混凝土开始脱落,根部卷边屈曲,南面西侧根部卷边屈曲;当加载至 72.33 mm 时,试件南面西侧根部混凝土开始脱落,北面东侧有大面积的混凝土脱落;

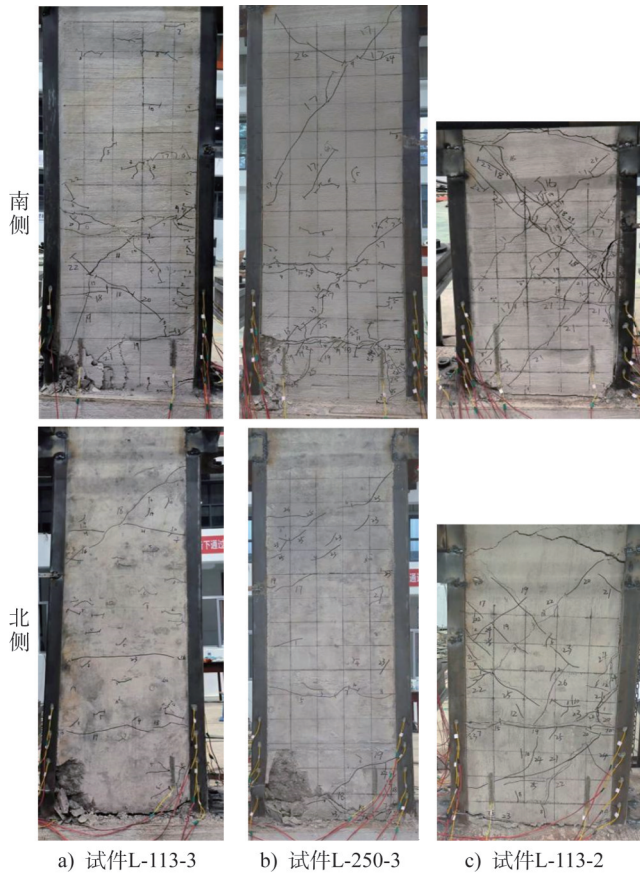


图4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimens

继续加载至84.39 mm时,试件承载力下降至峰值荷载的61%,试件破坏,试件南面西侧混凝土脱落,北面东侧卷边与翼缘被拉断,根部混凝土被压碎,西侧翼缘和卷边屈曲,梁身向南面倾斜。

2) 试件 L-250-3

对于L-250-3试件,当加载至+76.0 kN时,试件北面跨中出现两条水平裂缝;当加载至-76.0 kN时,试件南面跨中出现一条水平裂缝,北面出现一处交叉裂缝;随着荷载增加,裂缝出现位置逐渐变为根部且不断延伸,裂缝形态以水平裂缝为主;当加载至304.0 kN时,试件的荷载-位移曲线弯曲,翼缘应变测点处发生屈服,将该荷载下的位移35.51 mm作为屈服位移。当加载至53.27 mm时,试件南面西侧卷边屈曲,跨中东侧混凝土与卷边轻微脱离,北面东侧卷边屈曲,根部混凝土轻微压碎脱落;当加载至71.02 mm时,试件南面两侧卷边屈曲,西侧根部混凝土大面积脱落,北面东侧根部翼缘屈曲,混凝土脱落面积增大,卷边撕裂,撕裂处钢板向内凹陷;当加载至81.84 mm时,试件承载力下降至峰值荷载的58%,试件破坏,试件南面根部翼缘屈曲,北面卷边撕裂延伸至翼缘中间位置。

3) 试件 L-113-2

对于L-113-2试件,当加载至+112.0 kN时,试件南面跨中出现一条交叉裂缝,北面跨中出现两条水平裂缝;当加载至-112.0 kN时,试件南面跨中交叉裂缝开始延伸,北面跨中出现一条水平延伸裂缝,一条竖直延伸裂缝;当加载至448.0 kN时,试件的荷载-位移曲线弯曲,翼缘应变测点处发生屈服,将该荷载下的位移22.47 mm作为屈服位移,试件的裂缝随荷载增加不断延伸,其中斜裂缝居多,水平裂缝次之。当加载至44.94 mm时,试件北面西侧根部混凝土压碎,东面柱混凝土与柱翼缘脱离,试件南北面各有裂缝延伸形成一条贯通裂缝;当加载至56.18 mm时,试件南面西侧根部混凝土压碎,南北两面根部东侧卷边屈曲,跨中东侧混凝土与翼缘脱离,且都形成一条斜向贯通裂缝;当加载至67.41 mm时,试件向正方向加载至一半时,梁根部翼缘卷边撕裂,梁与柱翼缘被拉开,试件破坏。

2.2 破坏形态分析

3个试件的破坏主要发生在翼缘屈曲后,裂缝发展得不到有效抑制,试件逐渐开始破坏。L-113-3试件是梁根处的混凝土开始脱落,之后翼缘卷边屈曲开裂,最终破坏是水平裂缝贯通,斜向裂缝较少且未贯通,属于弯曲破坏。L-250-3试件先从翼缘屈曲开始,在循环往复中混凝土脱落,由于箍筋间距增大,所以斜向裂缝较多,最终破坏是斜向裂缝贯通,由于其斜向裂缝角度较小,属于弯剪破坏。L-113-2试件因剪跨比为2,相对于另外两个试件剪跨比较小,试验后存在多条斜向贯通裂缝和少量水平贯通裂缝,但由于试件梁与柱翼缘的黏结力不够,所以当翼缘卷边撕裂之后,梁被拉脱,属于弯曲破坏。

2.3 滞回曲线分析

试件的荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线如图5所示,根据图5可看出,试件L-113-3加载至位移为60.28 mm的第一个循环时,正向实测位移为60.31 mm,最大承载力为363.9 kN;负向实测位移为60.34 mm,最大承载力为389.4 kN。试件L-250-3加载至位移为71.02 mm的第一个循环时,正向实测位移为71.05 mm,最大承载力为346.7 kN;加载至位移为53.27 mm的第一个循环时,负向实测位移为53.30 mm,最大承载力为384.7 kN。试件L-113-2加载至位移为44.94 mm的第一个循环时,正向实测位移为44.96 mm,最大承载力为550.4 kN;加载至位移为56.18 mm的第一个循环时,负向实测位移为56.19 mm,最大承载力为611.8 kN。

对图5进一步分析,加载初期,试件均处于弹性状态,荷载与位移基本呈线性关系,滞回环包围面积很小,残余变形极小;随着荷载增加,由于试件混凝土裂缝开展

和翼缘逐渐屈服,试件塑性变形发展,加载过程中荷载与位移逐渐偏离线性关系。根据边缘屈服准则,当梁根处型钢翼缘屈服后,转换为位移加载方式,节点进入弹塑性阶段,此阶段滞回曲线斜率减小并出现弯曲现象,荷载增加较小而对应位移增幅增大,卸载后残余变形增大,滞回环面积逐渐增大。在加载至极限荷载的过程中,耗能持续增加,滞回曲线呈现细长的梭形和反 s 形;加载至极限承载力后,节点完全进入塑性阶段,随着位移加载的继续进行,试件承载力逐渐下降,滞回曲线变成较为饱满的梭形和反 s 形,说明三个试件在达到极限承载力后依旧保持着一定的延性和耗能能力,具有较好的抗震性能。试件 L-113-2 的滞回曲线存在明显的捏拢现象,其原因是产生了剪切变形,纵筋与混凝土之间的相对滑移变形较大。

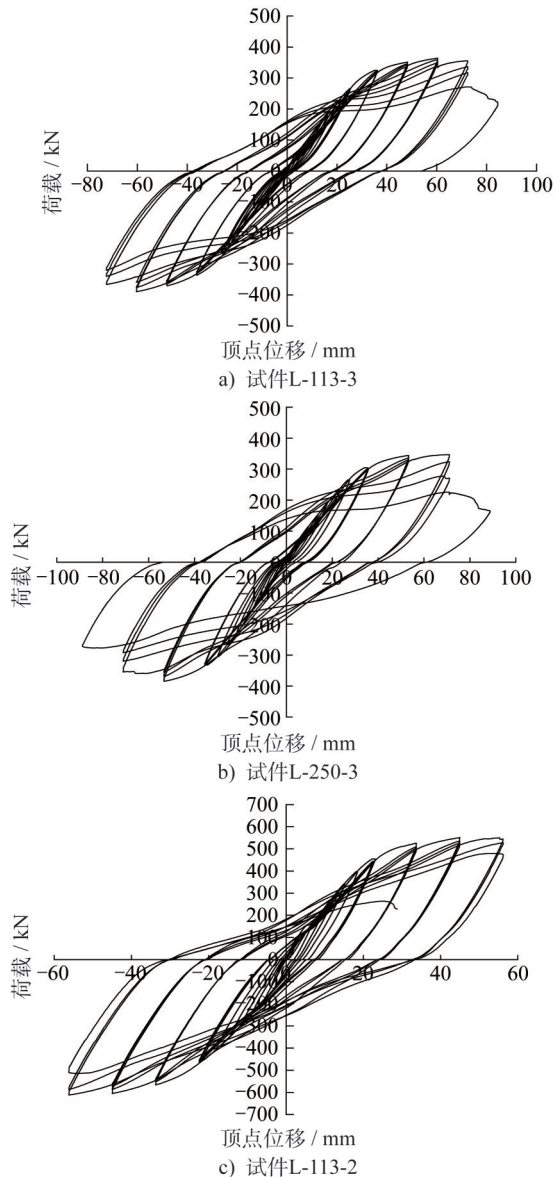


图 5 试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of specimens

由图 5 可知:

1) 当剪跨比为 3 时,试件 L-113-3 与试件 L-250-3 滞回曲线的轨迹相似度较高,试件 L-113-3 的滞回环面积稍大,在同级位移循环加载下的强度退化缓慢,滞回性能更加稳定。

2) 当箍筋间距为 113 mm 时,试件 L-113-2 与试件 L-113-3 相比,试件 L-113-2 的滞回环面积明显提高,但荷载达到最大值后试件的顶点位移因梁根部钢翼缘、腹板与柱翼缘连接处断裂而突降,且其同级位移循环加载下的强度退化较快,试件 L-113-3 的滞回性能更加稳定。

2.4 骨架曲线

各试件滞回曲线的骨架曲线如图 6 所示,由图可以看出,各试件的骨架曲线在极限荷载的前后级位移加载中发展趋势均较为平缓,说明该类试件在破坏前有较好的延性和较好的后期承载力。

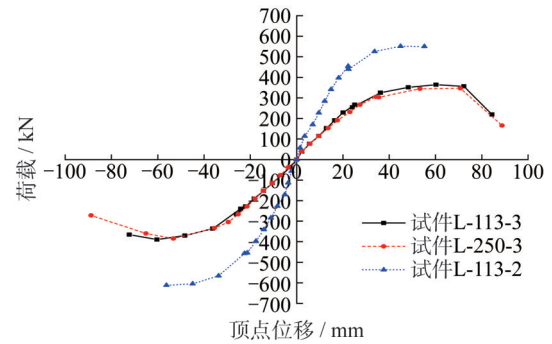


图 6 试件骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of specimens

由图 6 可知:

1) 当剪跨比为 3 时,试件 L-113-3 与试件 L-250-3 相比,试件 L-113-3 的极限承载力稍高,表明箍筋间距对于试件的极限承载力影响较小。加载至试验后期时,骨架曲线均有一段突降,是因为翼缘卷边撕裂,翼缘卷边组合界面协同作用失效,致使承载力快速下降。

2) 当箍筋间距为 113 mm 时,试件 L-113-3 和试件 L-113-2 相比,试件 L-113-2 的极限承载力远大于试件 L-113-3,表明剪跨比减小,承载力增大,梁上出现较多的水平裂缝与斜裂缝,为弯剪破坏,承载力有所提高。

2.5 延性分析

延性是指结构构件在外力作用下,承载力没有明显下降的弹塑性变形能力。在低周往复荷载试验中,延性反映的是试件梁端塑性铰形成以后构件在达到破坏之前的变形能力。采用位移延性系数 μ 来衡量试件的延性性能, $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, 式中 Δ_y 为试件屈服时的梁端位移,称为屈服位移,通过能量等值法来确定,如图 7 所示,当上下两

块阴影面积相等(即 $A_1=A_2$)时,拐点对应的位移为屈服位移,与曲线相交的点为屈服点; Δ_u 为试件最大承载力下降至85%时的位移,称为极限位移。延性系数越大表明结构构件的延性性能越好。试件延性系数计算结果见表3。

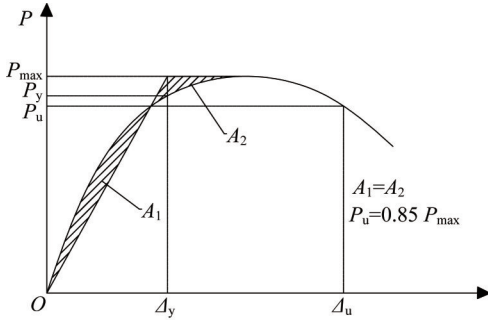


图7 能量等值法原理图

Fig. 7 Schematic diagram of energy equivalence method

表3 试件延性系数

Table 3 Ductility coefficients of specimens

试件编号	正向			负向		
	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数
L-113-3	21.86	76.48	3.50	24.59	72.38	2.94
L-250-3	21.99	76.07	3.45	23.62	76.97	3.26
L-113-2	16.34	56.21	3.44	18.31	56.19	3.07

由于试验中试件L-113-3在最后一圈正向加载时承载力下降过快,试验提前结束,负向加载未完成,所以试件L-113-3的负向延性系数不参与比较。

由表3可知:

1) 当剪跨比为3时,试件L-113-3比试件L-250-3的正向延性系数稍大,说明试件的箍筋间距减小有利于延性的提高。

2) 当箍筋间距为113 mm时,试件L-113-2比试件L-113-3的正向延性系数小,考虑到试件L-113-2在试验中因翼缘卷边和根部混凝土出现较大的破坏而停止试验,其正向极限位移对应的承载力为544.3 kN,为正向最大承载力的98.89%,两试件之间的正向延性系数之差仅为0.06,同时考虑到负向加载时试件L-113-3的极限位移对应的承载力是负向最大承载力的93.97%,而试件L-113-2的极限位移对应的承载力则是其负向最大承载力,因此试件L-113-2的延性比试件L-113-3的延性更好,剪跨比较小的试件延性更好。

2.6 耗能性能

结构耗能能力是评价结构抗震性能优劣的主要指标

之一。为了更准确地反映试件加载过程中的耗能能力,采用等效黏滞阻尼系数 h_e 进行评估。等效黏滞阻尼系数计算原理见图8,按式(1)计算。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{(ABC+ADC)}}{S_{(OBE+ODE)}} \quad (1)$$

S_{ABC} 和 S_{ADC} 为滞回曲线ABC和ADC与坐标轴x轴所包围的面积; S_{OBF} 和 S_{ODE} 为图中两个三角形OBF和ODE的面积,取试件滞回曲线的极限环和破坏环计算等效黏滞阻尼系数,计算结果见表4,为方便试件L-250-3的破坏环与试件L-113-3的破坏环进行比较,将破坏环向前取一圈。

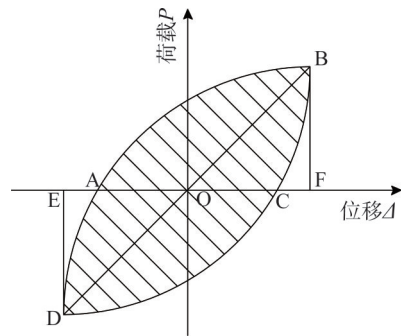


图8 等效黏滞阻尼系数计算原理图

Fig. 8 Schematic diagram of equivalent viscous damping coefficient calculation

表4 试件等效黏滞阻尼系数

Table 4 Equivalent viscous damping coefficients of specimens

试件编号	$S_{ABC}/$	$S_{ADC}/$	$S_{OBE}/$	$S_{ODE}/$	h_e	
	(kN·mm)	(kN·mm)	(kN·mm)	(kN·mm)		
极限环	L-113-3	10 702	14 134	10 973	11 742	0.174 0
	L-250-3	14 365	19 302	12 319	11 760	0.222 5
	L-113-2	17 575	22 800	15 287	17 189	0.197 9
破坏环	L-113-3	15 499	15 661	11 481	11 582	0.215 0
	L-250-3	15 879	15 743	9 629	10 376	0.251 6
	L-113-2	17 480	18 892	13 333	14 368	0.209 0

由表4可以看出:

1) 当剪跨比为3时,两根试件从极限环到破坏环的等效黏滞阻尼系数增加趋势相似,试件L-113-3等效黏滞阻尼系数的增量较多,但试件L-250-3的等效黏滞阻尼系数更高,极限环的 h_e 高出试件L-113-3极限环的 h_e 27.87%,破坏环的 h_e 高出试件L-113-3破坏环的 h_e 17.02%,试件L-250-3的耗能能力更强。

2) 当箍筋间距为113 mm时,处于极限环时,试件L-113-2的耗能能力稍高,但继续加载至破坏环时,试件

L-113-2的耗能能力增加较小,此时试件L-113-3的耗能能力要强于试件L-113-2的耗能能力,试件L-113-2出现较多的剪切破坏迹象,耗能能力在试件达到极限承载力之后增长缓慢,破坏也较为突然,因此剪跨比较大的试件耗能能力更强。

2.7 刚度退化

刚度退化指结构构件在加载过程中,当试件在相同峰值荷载加载下,峰值位移随着加载循环次数的增加而降低的现象。本文的刚度退化规律采用割线刚度 K 进行评估,按式(2)计算。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: K_i 为第 i 级加载下的割线刚度; $+P_i$ 和 $-P_i$ 分别为第 i 级加载下推、拉方向最大荷载值; $+\Delta_i$ 和 $-\Delta_i$ 分别为第 i 级加载下推、拉方向最大荷载对应的位移。各试件的刚度退化曲线如图9所示。

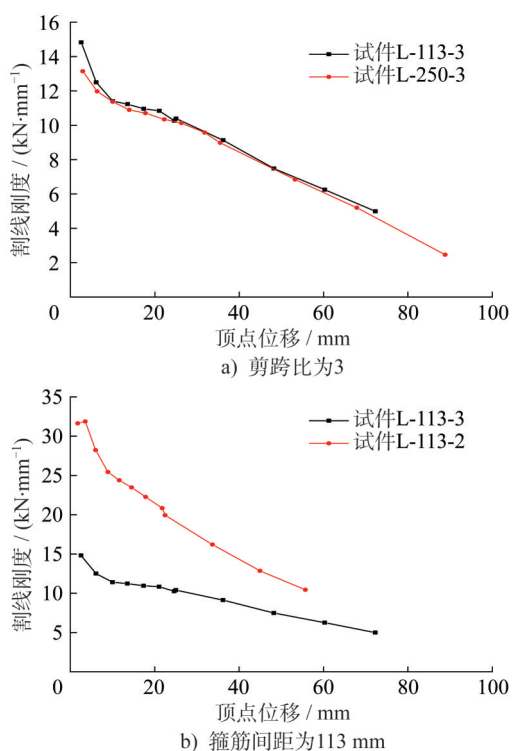


图9 试件刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness degradation curves of specimens

由图9可知:

1) 当剪跨比为3时,在加载初期,试件L-113-3的刚度较大,刚度退化也较快,在加载中期,两试件的刚度退化发展趋势高度相似,有多处重叠。该箍筋间距仅对试件加载之处有较大影响,箍筋间距小则初始刚度大,加载至中期后并无明显影响。

2) 当箍筋间距为113 mm时,在加载初期,试件

L-113-2的刚度远大于试件L-113-3的刚度,直至试验结束,试件L-113-2在同一位移下的刚度均较大,但试件L-113-2的刚度退化较快,该试件出现多条贯通斜向裂缝,属于剪切破坏,刚度退化曲线接近线性,而试件L-113-3的刚度退化曲线的下降则呈现出先快后慢的规律,展现出较好的抗震性能。

3 结论

本文通过对翼缘卷边蜂窝开孔 PEC 梁抗震性能的试验研究,得到如下主要结论:

(1) 翼缘卷边蜂窝开孔 PEC 梁的破坏模式均是受压侧翼缘屈曲伴随着受压区混凝土压碎,受拉侧翼缘撕裂伴随着混凝土脱落,破坏主要特征均为梁根处的翼缘卷边撕裂,故导致其承载力到达极限位移之后骤降,适当加厚根部的翼缘卷边或者使用角钢等进行加固可以提高 PEC 梁在极限位移下的承载力,从而充分发挥其延性与耗能能力。

(2) 剪跨比对于此 PEC 梁的裂缝形态有较大的影响,剪跨比小则以斜向裂缝发展为主,剪跨比大则以水平裂缝发展为主。箍筋间距对裂缝发展的影响较小,本试验中试件采用加密区 113 mm 的间距与 250 mm 的间距,各试件均以水平裂缝发展为主,250 mm 间距的试件存在少量斜向裂缝。

(3) 对于此 PEC 梁,剪跨比影响主要在于承载力与刚度退化方面,剪跨比越小,承载力越强,刚度退化越快,延性与耗能能力略微减弱,破坏形态越接近剪切破坏;箍筋间距的影响主要在于耗能能力方面,在一定范围内,箍筋间距越大,耗能能力增大,承载力、延性略微减小,刚度退化较缓,破坏形态越接近弯剪破坏。

(4) 本文研究的 PEC 梁采用翼缘卷边和蜂窝开孔的设计,卷边设计参与了翼缘的工作,使得翼缘突破规范中宽厚比的限值,且保持了良好的抗震性能。

本文仅对不同箍筋间距与剪跨比的翼缘卷边蜂窝开孔 PEC 梁进行了研究,试件的数量以及考虑的参数仍然偏少,为了明确各因素对于翼缘卷边蜂窝开孔 PEC 梁的影响,后续仍需要围绕此类构件考虑开孔率、卷边细部尺寸等参数的影响开展进一步研究,并可通过卷边处设置拉结板条等措施优化此类构件的构造形式。

参考文献:

- [1] AHN J K, LEE C H. Fire behavior and resistance of partially encased and slim-floor composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 129: 276-285. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.11.018.
- [2] 叶灵鹏,朱浩川,肖志斌,等.部分包覆钢-混凝土组合梁抗火性能研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(10):54-62. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.10.006.

- YE Lingpeng, ZHU Haochuan, XIAO Zhibin, et al. The fire resistance of partially encased composite steel and concrete beams [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2023, 25(10): 54-62. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.10.006. (in Chinese)
- [3] KINDMANN R, BERGMANN R, CAJOT L G, et al. Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beams[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1993, 27(1/2/3): 107-122. DOI: 10.1016/0143-974X(93)90009-H.
- [4] NAKAMURA S I, NARITA N. Bending and shear strengths of partially encased composite I-girders [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(12): 1435-1453. DOI: 10.1016/S0143-974X(3)00104-4.
- [5] KHARE N, SHINGADE V S. Flexural and shear response of concrete encased steel beams [J]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2016, 5(7): 13482-13491. DOI: 10.15680/IJRSET. 2016. 0507144.
- [6] 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(增刊1): 96-101. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.015.
ZHAO Gentian, WANG Liaoyang, FENG Chao. Research on seismic behavior of connections between slender partially concrete encased H steel column and steel beam [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(Suppl.1): 96-101. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.015. (in Chinese)
- [7] 李炜, 陈以一. H形钢翼缘间填充混凝土的部分组合梁抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(增刊1): 330-336. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.050.
LI Wei, CHEN Yiyi. Experimental study on seismic behavior of partially encased composite beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(Suppl. 1): 330-336. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S1.050. (in Chinese)
- [8] 伍凯, 林诗琪, 毛范桑, 等. 单向往复荷载作用下装配式部分包裹混凝土组合梁受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(8): 31-41. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0201.
WU Kai, LIN Shiqi, MAO Fanshen, et al. Experimental study on mechanical behavior of fabricated partially encased composite beams under unidirectional cyclic load [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(8): 31-41. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0201. (in Chinese)
- [9] 张广武, 王俭宝, 蒋涛, 等. 型钢部分包裹混凝土黏结滑移性能试验研究[J]. *混凝土*, 2020(1): 38-40.
ZHANG Guangwu, WANG Jianbao, JIANG Tao, et al. Experimental study on bond-slip behavior of partially encased concrete [J]. *Concrete*, 2020(1): 38-40. (in Chinese)
- [10] 陈以一, 林俊星, 李杰. 部分包裹钢-混凝土组合构件中主钢件翼缘的局部稳定性研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(7): 1-6. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.07.001.
CHEN Yiyi, LIN Junxing, LI Jie. Research on local stability performance of main steel flange in partially-encased composite steel and concrete members [J]. *Building Structure*, 2021, 51(7): 1-6. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.07.001. (in Chinese)
- [11] 李亚明, 刘宏欣, 贾水钟, 等. 局部半包裹部分包裹钢-混凝土组合梁受弯性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2024, 54(4): 1-8. DOI: 10.19701/j.jzjg.20231924.
LI Yaming, LIU Hongxin, JIA Shuizhong, et al. Experimental study on bending performance of partially semi-wrapped partially-encased composite beam with steel and concrete [J]. *Building Structure*, 2024, 54(4): 1-8. DOI: 10.19701/j.jzjg.20231924. (in Chinese)
- [12] 龚树红, 陈刚, 顾明明, 等. 部分包裹钢-混凝土组合梁在负弯矩作用下的刚度分析[J]. *钢结构(中英文)*, 2023, 38(6): 51-60. DOI: 10.13206/j.gjgS23030201.
GONG Shuhong, CHEN Gang, GU Mingming, et al. Stiffness analysis for partially encased steel-concrete composite beams subjected to hogging bending moment [J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2023, 38(6): 51-60. DOI: 10.13206/j.gjgS23030201. (in Chinese)
- [13] British Standards Institution (BSI). *Structural Use of Steelwork in Building-Part 1: Code of Practice for Design-Rolled and Welded Sections: BS 5950-1[S]*. London: British Standards Institution, 2000.
- [14] 武岳, 吴迪, 林国铎, 等. 六边形孔蜂窝梁力学性能与计算方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(2): 5-8.
WU Yue, WU Di, LIN Guoduo, et al. A simplified calculation method for the bearing capacity of hexagon-hole castellated beam [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(2): 5-8. (in Chinese)
- [15] 徐德新. 蜂窝形组合梁的承载力分析[J]. *电力建设*, 1993(1): 1-6.
XU Dexin. Bearing capacity analysis of honeycomb composite beams [J]. *Electric Power Construction*, 1993(1): 1-6. (in Chinese)
- [16] 贾连光, 孙宏达, 李庆文. 开孔形式对蜂窝框架抗震性能的影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(4): 666-673.
JIA Lianguang, SUN Hongda, LI Qingwen. Effect on seismic performance of cellular frame due to the web open form [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2011, 27(4): 666-673. (in Chinese)
- [17] 贾连光, 杜明坎, 回锋, 等. 六边形孔蜂窝梁和蜂窝组合梁抗剪性能分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(1): 81-87, 132.
JIA Lianguang, DU Mingkan, HUI Feng, et al. Analysis of shear behavior of hexagon hole cellular beam and cellular composite beam [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(1): 81-87, 132. (in Chinese)
- [18] 赵必大, 章雪峰, 王伟, 等. 部分包裹蜂窝钢-混凝土组合梁受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(7): 161-171. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0172.
ZHAO Bida, ZHANG Xuefeng, WANG Wei, et al.

- Experimental study on flexural behavior of partially-encased composite beam with castellated steel and concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(7): 161-171. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0172.(in Chinese)
- [19] 邹传仁,柯明中,周华标,等. 主钢件腹板开孔对部分包覆钢-混凝土组合梁性能的影响[J]. *建筑结构*, 2023, 53(增刊1): 1842-1847. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1360.
- ZOU Chuanren, KE Mingzhong, ZHOU Huabiao, et al. Influence of main steel web opening on the performance of partially clad steel-concrete composite beams [J]. *Building Structure*, 2023, 53 (Suppl. 1): 1842-1847. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1360.(in Chinese)