

引用本文:郁有升,郭亚楠. 钢框架内嵌角部圆弧缺口 AAC 砌体填充墙滞回性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 77-86.  
YU You-sheng, GUO Ya-nan. Study on Hysteretic Behavior of AAC Masonry Infill Wall with Circular-arc Openings at Corners Embedded in Steel Frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(1): 77-86.

DOI:10.19815/j.jace.2020.12062

# 钢框架内嵌角部圆弧缺口 AAC 砌体填充墙滞回性能研究

郁有升, 郭亚楠

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:**基于在填充墙的角部设置缺口可弱化拉(压)力带的原理,设计了一系列钢框架内嵌角部圆弧缺口填充墙试件,包括 1 个纯钢框架、1 个无缺口蒸压轻质加气混凝土(AAC)砌体填充墙钢框架和 9 个带不同尺寸圆弧缺口的 AAC 砌体填充墙钢框架,采用 ABAQUS 软件对各试件进行了有限元模拟分析。研究了填充墙角部设置的圆弧缺口构造对钢框架滞回性能、承载能力、延性、刚度退化、强度退化及耗能能力的影响。结果表明:填充墙角部设置的圆弧缺口构造可以削弱 AAC 砌体填充墙对钢框架承载能力的贡献,有效延缓墙体破坏,降低墙体对钢框架的附加刚度,延缓 AAC 砌体填充墙钢框架的刚度退化速率;填充墙角部设置的圆弧缺口构造还能改变 AAC 砌体填充墙的破坏模式;根据有限元分析结果,建议圆弧缺口的弧长为  $\pi l/2$ ,圆弧半径  $l$  为 AAC 砌体填充墙高度的  $1/10 \sim 1/7$ 。

**关键词:**蒸压轻质加气混凝土;填充墙;钢框架;相互作用;角部圆弧缺口;滞回性能

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)01-0077-10

## Study on Hysteretic Behavior of AAC Masonry Infill Wall with Circular-arc Openings at Corners Embedded in Steel Frame

YU You-sheng, GUO Ya-nan

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

**Abstract:** Based on the principle that setting openings at the corners of the infill wall could weaken the tension (compression) band, a series of specimens of infill wall with circular-arc openings at the corners embedded in steel frame were designed, including one pure steel frame, one autoclaved lightweight aerated concrete (AAC) masonry infilled steel frame without opening, nine AAC masonry infilled steel frame with different sizes circular-arc openings. The finite element analysis of each specimen was carried out by ABAQUS software. The influence of circular-arc openings at the corners of the infill wall on the hysteretic behavior, load-bearing capacity, ductility, stiffness degradation, strength degradation and energy dissipation capacity of steel frames were studied. The results show that the circular-arc openings at the corners of the infill wall can weaken the contribution of AAC masonry infill wall to the load-bearing capacity of

收稿日期:2021-04-11

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE068)

作者简介:郁有升(1976-),男,山东临沂人,副教授,工学博士, E-mail: yuyousheng@126.com。

steel frame, effectively delay the failure of the infill wall, reduce the additional stiffness of the infill wall for the steel frame structures, and delay the stiffness degradation rate of AAC masonry infill wall embedded in steel frame. The circular-arc openings can also change the failure mode of the AAC masonry infill wall. According to the results of finite element analysis, it is suggested that the arc length of circular-arc openings is  $\pi l/2$  and the radius  $l$  is 1/10-1/7 of the height of AAC masonry infill wall.

**Key words:** autoclaved lightweight aerated concrete; infill wall; steel frame; interaction; circular-arc opening at the corner; hysteretic behavior

## 0 引言

填充墙框架结构在国内外建筑领域得到了广泛的应用。在传统的结构设计中,由于填充墙通常被视为一种建筑围护结构<sup>[1-2]</sup>,其与框架结构间的相互作用常常被忽略<sup>[3]</sup>。然而,由 2008 年中国汶川地震的调查结果及相关研究可知,填充墙的刚度效应及约束效应对框架结构产生了不利的影响<sup>[4-5]</sup>。针对此问题,有研究者提出了带缺口的填充墙<sup>[6-7]</sup>。周云等<sup>[8]</sup>提出了对填充墙进行开缝处理的做法。唐兴荣等<sup>[9]</sup>对带竖缝的砌体填充墙钢筋混凝土(RC)框架结构进行了低周反复荷载作用下的对比试验。李艳艳等<sup>[10]</sup>对带缝填充墙 RC 框架结构进行了抗震性能试验研究,结果表明竖缝的宽度对填充墙框架结构的结构性能有着重要的影响。Jiang 等<sup>[11]</sup>对砌体填充墙 RC 框架结构进行了试验,结果发现柔性连接降低了框架的强度、刚度和耗能能力,但提高了其延性。Sun 等<sup>[12-13]</sup>对带钢筋混凝土填充墙的部分约束钢框架(PSRCW)进行了试验研究,结果发现带有竖缝的 PSRCW 具有更大的延性、变形性能和耗能能力。Yuen 等<sup>[14]</sup>对带缝砌体填充墙 RC 框架进行了振动台试验,结果表明带缝构造可有效减少填充墙和框架之间不利的相互作用。郁有升等<sup>[15-16]</sup>对带竖缝的压蒸无石棉纤维素纤维水泥平板(CCA)填充墙钢框架结构进行了试验及有限元研究,结果发现带缝构造能有效延缓 CCA 填充墙的开裂,弱化 CCA 填充墙对钢框架承载能力及刚度的贡献。

如上所述,近几年来国内外对带缺口填充墙框架的研究主要集中在钢筋混凝土框架上,且缺口形式多为对填充墙的竖向开缝及横向开缝,对角部带圆弧缺口的填充墙钢框架结构(图 1,其中, $L'$ 、 $H'$  分别为 AAC 砌体填充墙的跨度、高度, $l_1$  为圆弧缺口端点到填充墙角部的距离, $l_2$  为圆弧缺口中点到填充墙角部的距离)少有研究。基于在填充墙的角度设置缺口可弱化其拉(压)力带的原理,本文利用有

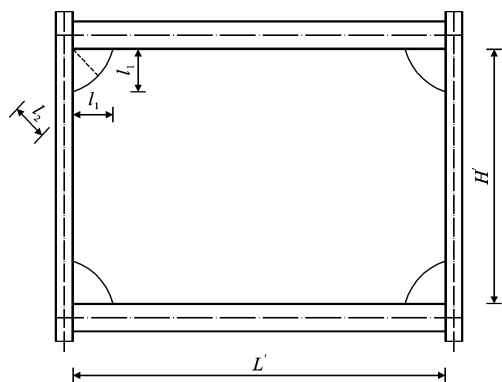


图 1 圆弧缺口 AAC 砌体填充墙钢框架示意图

Fig. 1 Diagram of AAC Masonry Infill Wall with Circular-arc Openings Embedded in Steel Frame

限元软件 ABAQUS 对带圆弧缺口的蒸压轻质加气混凝土(AAC)砌体填充墙钢框架进行模拟分析,研究填充墙设置圆弧缺口构造对钢框架滞回性能、承载能力、延性、刚度退化、强度退化及耗能能力的影响,并确定圆弧缺口尺寸的最优取值范围。

## 1 有限元分析

### 1.1 试件设计

本文共设计了 11 个试件,钢材均采用 Q355 钢,各试件的参数如表 1 所示。各试件的跨度均为 4 400 mm,层高中 3 000 mm,梁、柱截面尺寸分别为 H300×150×6.5×9、H200×200×8×12。KJ-1 试件为纯钢框架,KJ-2 试件为无缺口的 AAC 砌体填充墙钢框架,KJ-3 试件组为带缺口的 AAC 砌体填充墙钢框架,墙体厚度均为 100 mm。KJ-3 试件组的缺口设置在 AAC 砌体填充墙的 4 个角部,缺口呈圆弧状,圆弧缺口的弧长  $S = \pi l/2$  ( $l$  为圆弧半径);KJ-3 试件组包括 9 个试件,即 KJ-3-1~KJ-3-9,参数变量为圆弧缺口端点到填充墙角部的距离  $l_1$ 、圆弧缺口中点到填充墙角部的距离  $l_2$ , $l_1 = l_2 = l$ 。各试件的尺寸及构造示意图如图 2 所示。

### 1.2 有限元模型的建立

利用有限元软件 ABAQUS<sup>[17]</sup> 建立有限元模

表 1 试件参数  
Table 1 Parameters of Specimens

试件编号		试件特征	圆弧缺口						
			数量	位置	$l_1/H'$	$l_1/\text{mm}$	$l_2/\text{mm}$	$S/\text{mm}$	开洞率/%
KJ-1		纯钢框架							
KJ-2		无缺口 AAC 砌体填充墙钢框架	0						
KJ-3 组	KJ-3-1	带缺口 AAC 砌体填充墙钢框架	4	AAC 砌体填充墙的 4 个角部	1/12	225	225	353.43	1.40
	KJ-3-2				1/11	245	245	384.85	1.66
	KJ-3-3				1/10	270	270	424.12	2.02
	KJ-3-4				1/9	300	300	471.24	2.49
	KJ-3-5				1/8	337	337	529.36	3.15
	KJ-3-6				1/7	386	386	606.33	4.13
	KJ-3-7				1/6	450	450	706.86	5.61
	KJ-3-8				1/5	540	540	848.23	8.08
	KJ-3-9				1/4	675	675	1 060.29	12.62

型,模型由钢梁、钢柱、加劲肋以及 AAC 砌体填充墙组成。采用实体单元 C3D8R 模拟钢梁、钢柱、加劲肋以及 AAC 砌体填充墙。采用“Tie”模拟钢柱与钢梁、钢柱与加劲肋、钢柱与 AAC 砌体填充墙的连接,建立钢梁与 AAC 砌体填充墙的接触关系。为避免填充墙的平面外失稳,限制框架在  $x$  方向的位移,即  $U_x=0$ 。为模拟柱脚的固定连接,对柱脚进行全方位的自由度约束,即  $U_x=U_y=U_z=0,R_x=R_y=R_z=0$ ,其中  $U_x、U_y、U_z$  分别为柱脚在  $x、y、z$  方向的平动自由度, $R_x、R_y、R_z$  分别为柱脚在  $x、y、z$  方向的转动自由度。耦合与顶梁相对应的柱外侧翼缘各节点沿  $y$  方向的自由度,在耦合点处施加沿  $y$  方向的低周反复荷载。有限元模型如图 3 所示。

钢材的材料参数参照文献[18],弹性模量  $E$  为  $2.06\times10^5$  MPa,泊松比  $\nu$  为 0.3,应力-应变( $\sigma\epsilon$ )曲线采用考虑强化段和下降段的三折线模型,如图 4(a)所示。AAC 砌体的本构关系采用砌体应力-应变试验所得出的本构关系<sup>[19]</sup>,如图 4(b)所示,其中,  $f_m$  为砌体抗压强度平均值,  $\epsilon_0$  为砌体的峰值应变。AAC 砌体的弹性模量为 1 745 MPa,泊松比为 0.2。

根据美国 AISC 抗震规范<sup>[20]</sup>,模型采用位移控制加载。加载过程为:以层间位移角  $\theta$  为 0.225% 时的位移为加载位移,循环往复 3 次;以  $\theta=0.5\%$  时的位移为加载位移,循环往复 2 次;之后层间位移角每次增加 0.5% 为一组,每组循环 2 次;以  $\theta=8\%$  时的位移为加载位移,循环往复 2 次;之后层间位移角每次增加 1% 为一组,每组循环 2 次。层间位移角  $\theta$  的计算示意图如图 5 所示,  $\theta=\Delta/H$ ,  $\Delta$  为试件的层间位移,  $H$  为试件的层高。

1.3 模型验证

基于本文的建模方法及文献[21]中 KJ-3 试件组的数据建立有限元模型,将模拟所得的骨架曲线与文献[21]中 KJ-2 试件试验所得的骨架曲线进行对比,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,有限元模拟结果与试验结果基本一致。由于有限元模拟过程中对柱脚滑移和平面外位移的限制较好,有限元模拟得到的峰值荷载略高于试验所得的峰值荷载,说明有限元分析方法的正确性得到了验证。

2 有限元结果分析

2.1 破坏特征

对于试件 KJ-1,当  $\theta<1.5\%$  时,试件处于弹性阶段;当  $\theta=10\%$  左右时,4 个钢框架梁柱节点域变形严重;当  $\theta=12\%$  左右时,非加载端的上部梁柱节点附近的钢梁下翼缘出现屈曲,随后钢梁上翼缘也出现屈曲;当  $\theta=20\%$  左右时,非加载端的上部梁柱节点附近的钢梁上下翼缘屈曲严重,加载结束,如图 7(a)所示。

通过对 10 个 AAC 砌体填充墙钢框架试件(KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-9)进行有限元分析可知,各试件的破坏模式相似,破坏过程可分为 3 个阶段,即恒定摩擦阶段、剪切摩擦阶段、塑性破坏阶段。在恒定摩擦阶段,对于 KJ-2 试件,AAC 砌体填充墙的 4 个角部与钢框架梁柱节点区域产生摩擦,填充墙角部的应力增大;对于 KJ-3-1~KJ-3-9 试件,由于 AAC 砌体填充墙 4 个角部与钢框架梁柱节点附近存在初始缺口,因此 AAC 砌体填充墙与钢框架梁柱节点

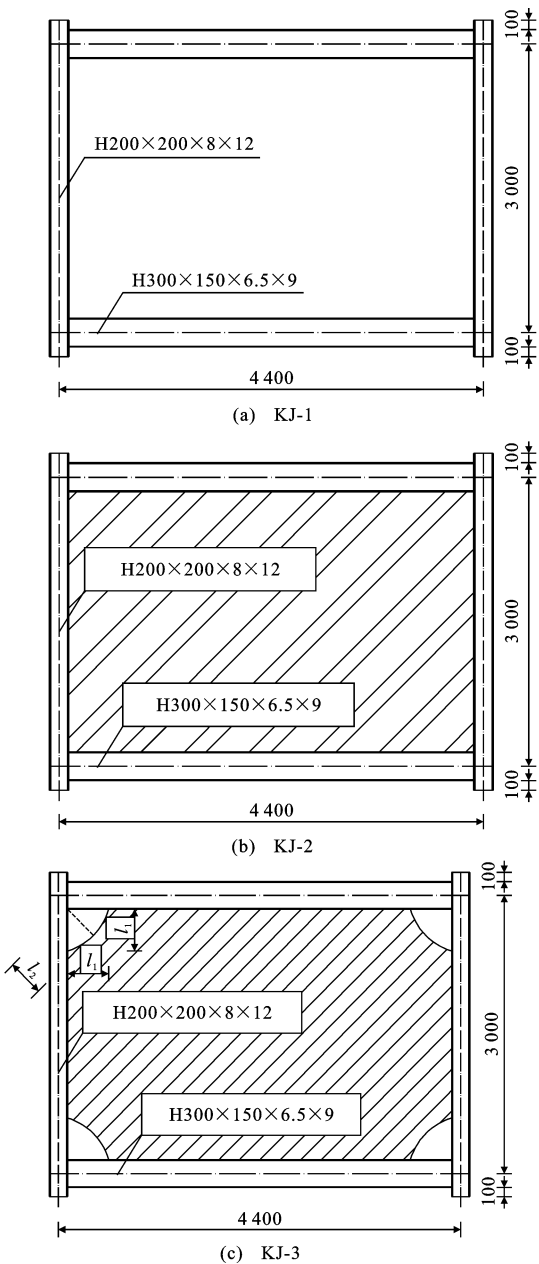


图 2 各试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of Specimens (Unit:mm)

区域无接触,填充墙通过 AAC 砌体间的摩擦承担较小横向荷载。在剪切摩擦阶段,钢框架对 AAC 砌体填充墙产生了约束作用,AAC 砌体填充墙上产生了沿对角线方向的拉(压)力带,AAC 砌体填充墙对钢框架承载能力的贡献逐渐增大。在塑性破坏阶段,AAC 砌体填充墙对钢框架承载能力的贡献减小,AAC 砌体填充墙因破坏严重而逐渐退出工作。KJ-2 试件在  $\theta=5\%$  时的荷载低于其极限荷载的 85%,说明  $\theta=5\%$  时试件破坏,如图 7(b)、(c)所示,AAC 砌体填充墙 4 个角部出现明显应力集中,鼓曲现象明显。KJ-3 试件组以 KJ-3-5 试件为例,图 7

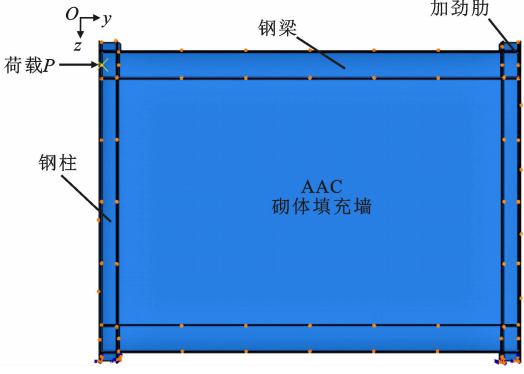
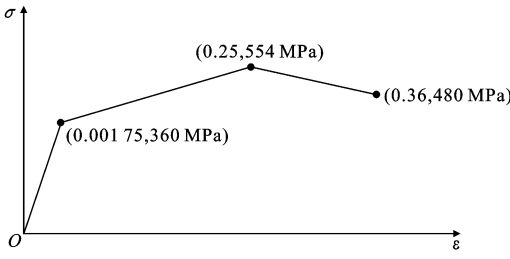
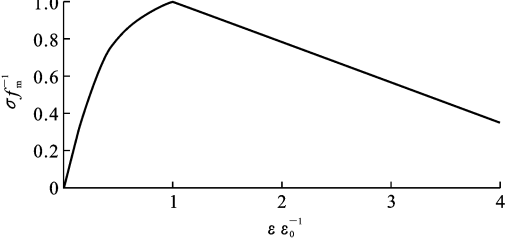


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model



(a) 钢材本构关系



(b) AAC砌体本构关系

图 4 材料本构关系曲线

Fig. 4 Material Constitutive Relationship Curves

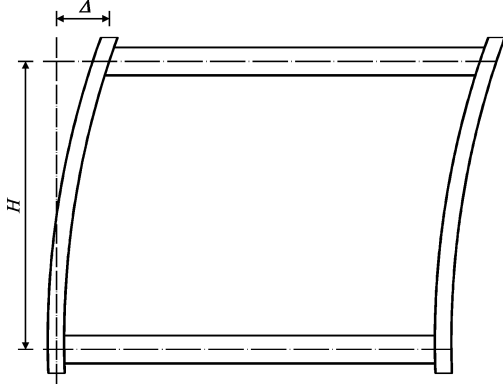


图 5 层间位移角  $\theta$  的计算示意图

Fig. 5 Calculation Diagram of Inter-story Drift Ratio  $\theta$

(d)、(e)展示了试件在  $\theta=5.5\%$  时的应力云图,角部圆弧缺口的存在削弱了试件破坏时 AAC 砌体填充墙的应力集中现象及鼓曲现象。

2.2 滞回曲线

图 8 为各试件的侧向荷载-位移滞回曲线。从

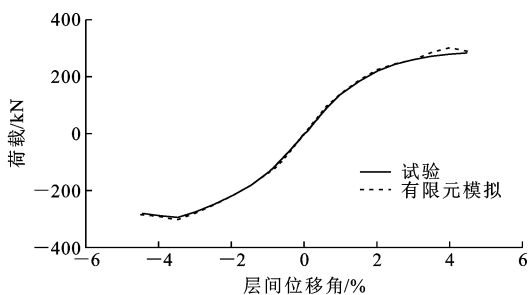


图 6 试验与有限元模拟的骨架曲线对比

Fig. 6 Comparison of Skeleton Curves Between Test and Finite Element Simulation

图 8 可以看出,各试件均具有饱满的滞回曲线,表明各试件均具有较强的耗能能力。KJ-1、KJ-3-7~KJ-3-9 的滞回曲线呈梭形;KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-6 的滞回曲线由梭形向弓形发展,滞回曲线存在“捏拢”现象,反映了对开裂后 AAC 砌体填充墙滑移的影响。与 KJ-1 相比, AAC 砌体填充墙钢框架的最大荷载

明显增大,表明 AAC 砌体填充墙的存在显著提高了框架结构的承载能力。与带缺口 AAC 砌体填充墙钢框架相比, KJ-2 的平面内侧移刚度较大,在相同的侧向位移条件下, KJ-2 对结构的荷载贡献较大,墙体开裂较早。此外,带缺口 AAC 砌体填充墙钢框架曲线斜率的下降速率明显小于 KJ-2,说明带缺口构造可以有效延缓 AAC 砌体填充墙钢框架结构的刚度退化速率。

### 2.3 骨架曲线及延性

各试件的骨架曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出,试件 KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-9 的正向极限承载力分别比 KJ-1 高 68.3%、55.2%、56.5%、49.5%、49.0%、47.3%、39.9%、37.4%、27.4%、8.7%,说明 AAC 砌体填充墙的存在显著提高了钢框架结构的承载能力,而带缺口构造可降低填充墙对框架结构承载力的参与程度。当层间位移角大于 4.5% 时,

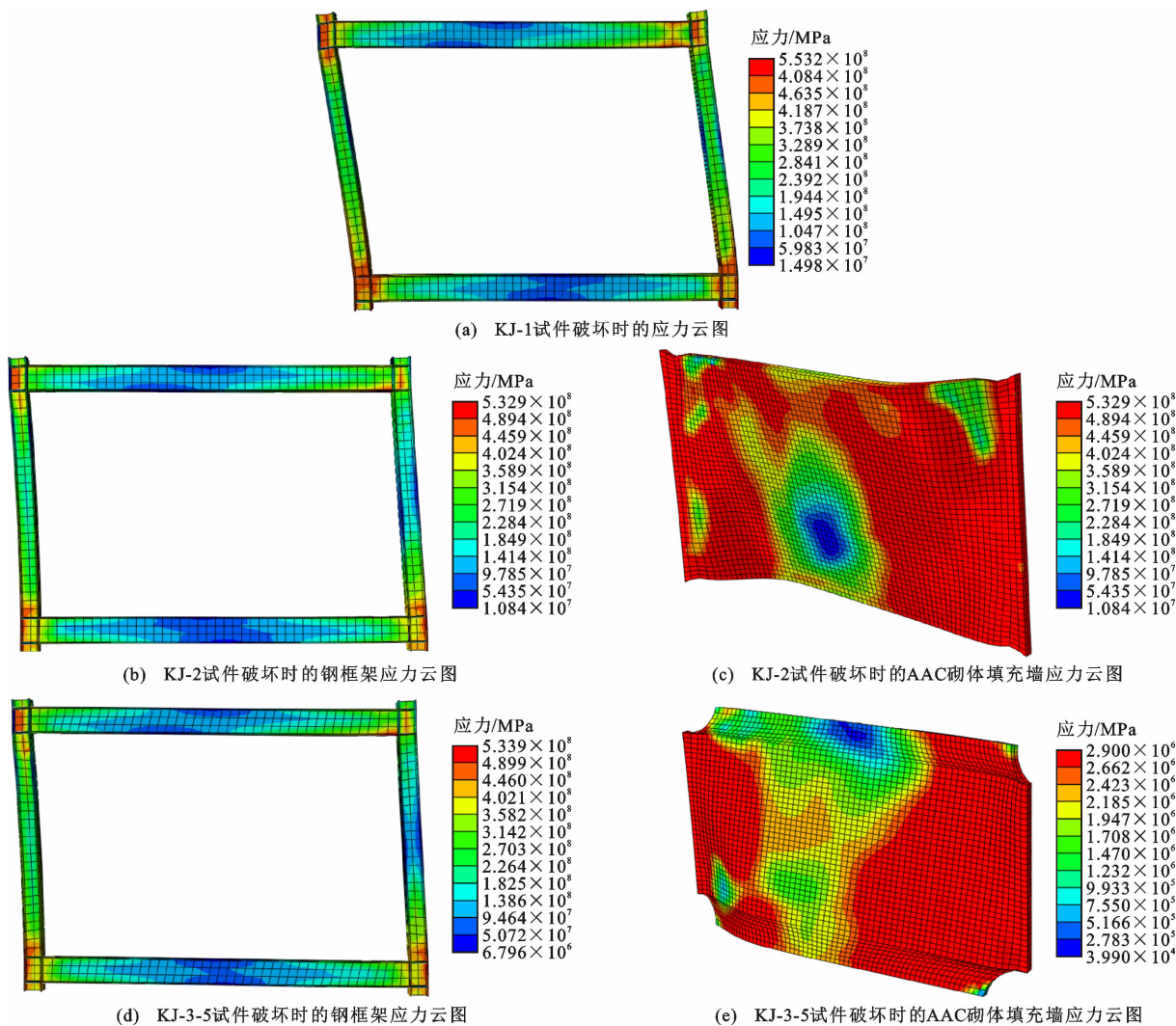


图 7 各试件破坏时的应力云图

Fig. 7 Stress Nephogram of Specimens when Failure

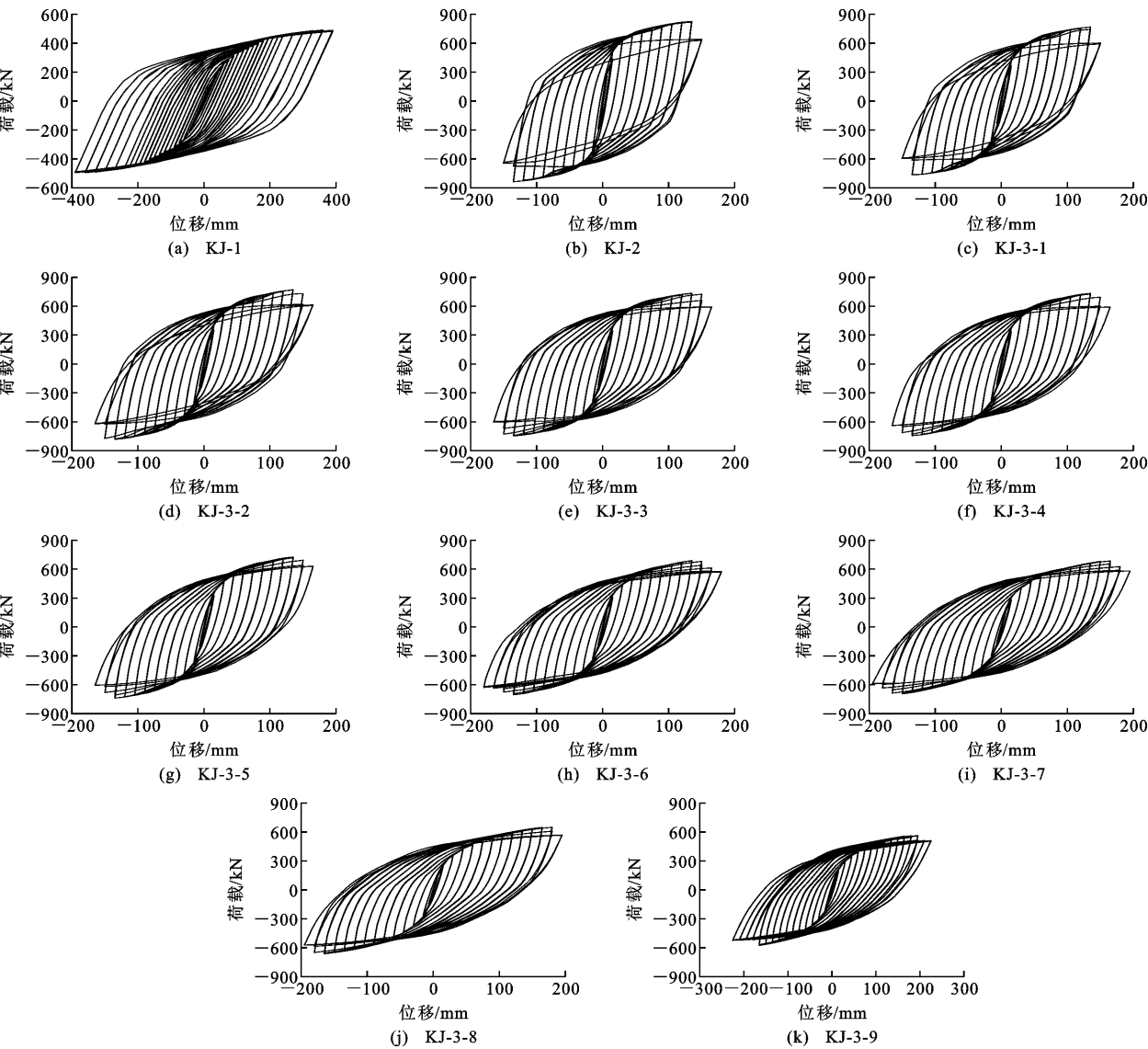


图 8 各试件的滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis Curves of Specimens

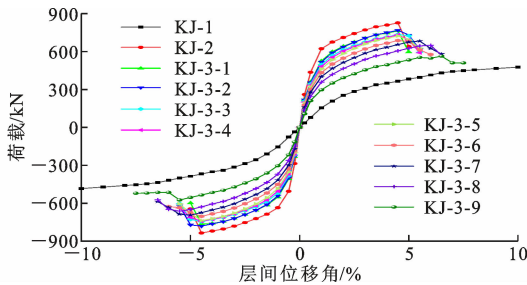


图 9 各试件的骨架曲线

Fig. 9 Skeleton Curves of Specimens

KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-6 的骨架曲线出现下降段,这是由填充墙破坏引起的。延性系数  $\mu$  可通过公式  $\mu = \Delta_u / \Delta_y$  ( $\Delta_u$ 、 $\Delta_y$  分别为试件的极限变形和屈服变形) 获得,反映了各试件的塑性变形性能。延性系数越大,结构可在强震作用下承受大的塑性变形而不破

坏。通过对比可以发现各试件的延性系数  $\mu$  在 8~10,表明各试件具有良好的延性及变形性能。图 10 给出了屈服荷载  $P_y$ 、屈服位移  $\theta_y$ 、极限荷载  $P_u$ 、极限位移  $\theta_u$  主要性能点的定义,主要性能点参数数值详见表 2。

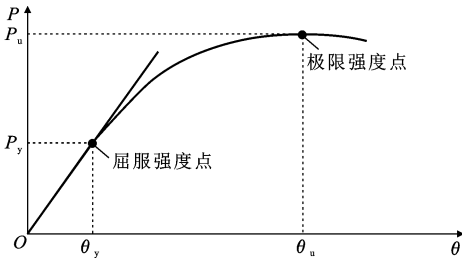


图 10 主要性能点的定义

Fig. 10 Definition of Main Performance Points

2.4 刚度退化

为了分析 AAC 砌体填充墙对钢框架结构的附加刚度以及带不同尺寸圆弧缺口的 AAC 砌体填充墙对填充墙钢框架结构的附加刚度,获得低周反复荷载作用下试件的刚度退化规律,对  $j$  加载级下试件的刚度  $K_j$  进行了对比分析,刚度退化表达式如公式(1)所示。

$$K_j = \sum_{i=1}^k P_{i,j} / \sum_{i=1}^k \theta_{i,j}$$

(1)

式中: $P_{i,j}$ 为  $j$  加载级下第  $i$  个循环峰值处的荷载值; $\theta_{i,j}$ 为  $j$  加载级下第  $i$  个循环峰值处的位移值; $j=1$  加载级时  $k=3,j>1$  加载级时  $k=2$ 。

表 3 给出了初始刚度  $K_0$ 、屈服荷载对应的刚度  $K_y$ 、极限荷载对应的刚度  $K_u$ 、AAC 砌体填充墙钢框架与 KJ-1 的刚度之比  $\eta_m$  等主要性能参数,其中  $\eta_m$  可按公式(2)计算。

表 2 主要性能点参数

Table 2 Parameters of Main Performance Points

试件编号	$P_y/\text{kN}$		$\theta_y/\%$		$P_u/\text{kN}$		$\theta_u/\%$		$\mu$	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向
KJ-1	208.35	−209.94	1.5	−1.5	490.85	−496.74	12.0	−12.0	8	8
KJ-2	435.71	−505.87	0.5	−0.5	826.11	−835.79	4.5	−4.5	9	9
KJ-3-1	360.13	−407.19	0.5	−0.5	761.91	−764.56	4.5	−4.5	9	9
KJ-3-2	353.97	−398.60	0.5	−0.5	767.99	−781.48	4.5	−4.5	9	9
KJ-3-3	342.27	−382.49	0.5	−0.5	733.83	−746.20	4.5	−4.5	9	9
KJ-3-4	332.28	−369.22	0.5	−0.5	731.16	−742.49	4.5	−4.5	9	9
KJ-3-5	319.58	−352.88	0.5	−0.5	722.97	−736.83	4.5	−4.5	9	9
KJ-3-6	300.07	−327.90	0.5	−0.5	686.57	−703.72	4.5	−4.5	9	9
KJ-3-7	277.02	−299.63	0.5	−0.5	682.03	−694.39	5.5	−5.0	11	10
KJ-3-8	244.71	−262.08	0.5	−0.5	648.90	−662.84	6.0	−5.5	12	11
KJ-3-9	211.01	−219.27	0.5	−0.5	562.81	−574.68	6.5	−5.5	13	11

表 3 刚度取值

Table 3 Stiffness Values

试件编号	$K_0/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$		$K_y/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$		$K_u/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$		$\eta_0$	$\eta_y$	$\eta_u$
	正向	负向	正向	负向	正向	负向			
KJ-1	5.17	5.17	4.65	4.68	1.36	1.38	1.00	1.00	1.00
KJ-2	42.00	43.38	31.40	33.76	6.09	5.59	8.12	6.75	4.48
KJ-3-1	34.17	34.68	25.60	27.22	5.55	5.10	6.61	5.51	4.08
KJ-3-2	33.41	33.93	25.13	26.64	5.69	5.77	6.46	5.40	4.18
KJ-3-3	32.05	32.50	24.21	25.57	5.44	5.51	6.20	5.21	4.00
KJ-3-4	30.84	31.33	23.43	24.68	5.39	5.44	5.97	5.04	3.96
KJ-3-5	29.34	29.88	22.46	23.58	5.33	5.35	5.68	4.83	3.92
KJ-3-6	27.14	27.64	21.00	21.92	5.09	5.17	5.25	4.52	3.74
KJ-3-7	24.63	25.13	19.30	20.04	4.04	4.61	4.76	4.15	3.16
KJ-3-8	21.31	21.82	16.96	17.53	3.49	3.99	4.12	3.65	2.73
KJ-3-9	16.66	17.08	14.29	14.67	2.76	3.46	3.22	2.91	2.27

$$\eta_m = \frac{K_{+m,n} + K_{-m,n}}{K_{+m,1} + K_{-m,1}}$$

(2)

式中: $m=0,y,u;K_{+m,1},K_{-m,1}$  分别为试件 KJ-1 的正向刚度和负向刚度; $K_{+m,n},K_{-m,n}$  分别为 AAC 砌体填充墙钢框架试件的正向刚度和负向刚度。

各试件的刚度退化曲线见图 11。由于填充墙对钢框架结构的刚度效应,KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-9 的初始刚度均大于 KJ-1,分别为 KJ-1 的 8.12 倍、6.61 倍、6.46 倍、6.20 倍、5.97 倍、5.68 倍、5.25 倍、4.76 倍、4.12 倍和 3.22 倍。随着层间位移角的增大,试件进入弹塑性阶段,各试件的刚度明显降低。由图 11 可知,KJ-3-1~KJ-3-9 的刚度退化曲线斜率明显小于 KJ-2,说明带缺口构造可以有效延缓 AAC 砌体填充墙钢框架结构的刚度退化速率。KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-9 的刚度退化曲线斜率大于 KJ-1,原因在于 AAC 砌体填充墙的开裂及破碎使得其对

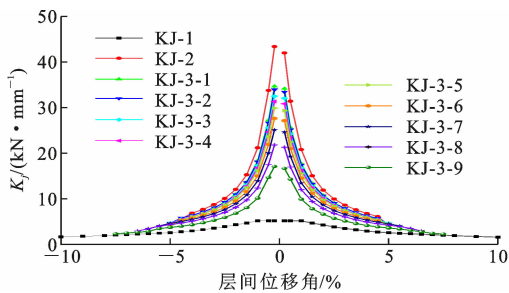


图 11 各试件的刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness Degradation Curves of Specimens

钢框架的刚度效应减小。当 $\theta < 4.5\%$ 时, KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-6 的刚度由 AAC 砌体填充墙和钢框架共同提供; 当 $\theta > 4.5\%$ 时, 其刚度主要由钢框架提供。

2.5 强度退化

试件的强度退化系数 $\lambda_i$ 可按公式(3)计算。

$$\lambda_i = \frac{P_{i,j}}{P_{i-1,j}} \tag{3}$$

式中: $P_{i-1,j}$ 为 $j$ 加载级下第 $i-1$ 个循环峰值处的荷载值。

图 12 为各试件在加载过程中的强度退化系数曲线。研究表明, 各试件的强度退化系数一般随层间位移角的增大而减小。由图 12 可知: 当层间位移角在 $-4\% \sim -1\%$ 及 $1\% \sim 4\%$ 范围内时, 各试件的强度退化系数在 $1.00 \sim 1.02$ 之间; 当 $\theta > 4\%$ 时, KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-6 的强度退化系数明显减小, 在 $0.81 \sim 1.01$ 之间, 说明 KJ-2、KJ-3-1~KJ-3-6 的 AAC 砌体填充墙逐渐被破坏。表 4 给出了各试件在不同加载阶段强度退化系数的变化范围。从表 4 可以看出, KJ-1 的强度几乎没有退化, 强度退化系数在 $0.99 \sim 1.03$ 范围内波动。当 AAC 砌体填充墙钢框架试件处于弹性阶段( $P \leq P_y$ )时, KJ-2 的强度退化系数大于带缺口 AAC 砌体填充墙钢框架的强度退化系数; 当 AAC 砌体填充墙钢框架试件处于非弹性阶段( $P > P_y$ )时, KJ-2 的强度退化系数明显小于带缺口 AAC 砌体填充墙钢框架的强度退化系数, 说明带缺口构造延缓了填充墙钢框架结构的强度退化。

2.6 耗能能力

等效黏滞阻尼系数计算示意图如图 13 所示。根据公式(4)计算等效黏滞阻尼系数 $h_e$ , 以此来衡量试件的耗能能力。

$$h_e = \frac{S_{FBE} + S_{FDE}}{2\pi(S_{\triangle ABO} + S_{\triangle CDO})} \tag{4}$$

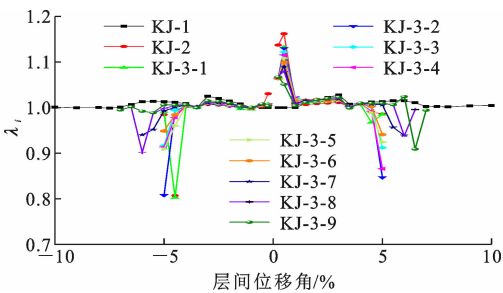


图 12 各试件的强度退化系数曲线

Fig. 12 Strength Degradation Curves of Specimens

表 4 强度退化系数

Table 4 Strength Degradation Coefficient

试件编号	不同荷载条件下的强度退化系数		
	$P \leq P_y$	$P_y < P \leq P_u$	$P > P_u$
KJ-1		0.99~1.03	
KJ-2	1.00~1.16	0.81~1.01	0.81~0.99
KJ-3-1	1.00~1.13	0.81~1.02	0.81~0.99
KJ-3-2	1.00~1.13	0.99~1.02	0.81~1.00
KJ-3-3	1.01~1.12	0.99~1.02	0.91~1.00
KJ-3-4	1.01~1.12	0.98~1.02	0.87~0.99
KJ-3-5	1.00~1.11	0.96~1.02	0.91~0.99
KJ-3-6	1.00~1.10	0.98~1.02	0.94~1.00
KJ-3-7	1.00~1.09	0.96~1.02	0.94~0.99
KJ-3-8	1.00~1.08	0.94~1.02	0.90~1.00
KJ-3-9	1.00~1.07	0.91~1.02	0.99~1.00

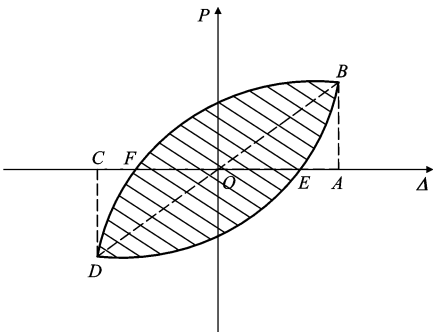


图 13 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig. 13 Calculating Diagram of Equivalent Viscous Damping Coefficient

式中: $S_{FBE}$ 、 $S_{FDE}$ 分别为一个加载循环中的滞回曲线面积;  $S_{\triangle ABO}$ 、 $S_{\triangle CDO}$ 分别为 $\triangle ABO$ 和 $\triangle CDO$ 的面积。

图 14 为各试件的等效黏滞阻尼系数曲线。由图 14 可知, KJ-1 的等效黏滞阻尼系数随层间位移角的增大而逐渐增大。对于 AAC 砌体填充墙钢框架, 当 $\theta < 4\%$ 时, 各试件的等效黏滞阻尼系数均随层间位移角的增大而增大; 当 $\theta > 4\%$ 时, KJ-2、KJ-3-2、KJ-3-3、KJ-3-7 的等效黏滞阻尼系数随层间位移

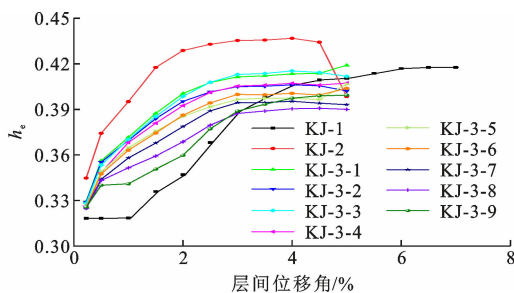


图 14 各试件的等效黏滞阻尼系数曲线  
Fig. 14 Equivalent Viscous Damping Coefficient Curves of Specimens

角的增大而减小。这表明 KJ-2、KJ-3-2、KJ-3-3、KJ-3-7 的填充墙因破坏严重而逐渐退出工作。当  $\theta < 3\%$  时, AAC 砌体填充墙钢框架的耗能能力大于 KJ-1 的耗能能力;当  $\theta > 5\%$  时, AAC 砌体填充墙钢框架的耗能能力小于 KJ-1 的耗能能力。这表明填充墙的存在提高了钢框架结构的耗能能力,但由于填充墙的变形能力差,使得填充墙钢框架先于纯钢框架发生破坏。此外,当  $\theta < 3.0\%$  时, KJ-2 的等效黏滞阻尼系数增长率明显大于 KJ-3-1~KJ-3-9,且 KJ-3-1~KJ-3-9 的等效黏滞阻尼系数增长率随圆弧缺口的增大而逐渐减小;随着层间位移角的增大,各 AAC 砌体填充墙钢框架的等效黏滞阻尼系数增长率逐渐减小;当  $\theta$  在  $3.0\% \sim 4.5\%$  范围内时,各 AAC 砌体填充墙钢框架的等效黏滞阻尼系数曲线趋于平缓。

### 3 结 语

(1)与纯钢框架相比, AAC 砌体填充墙钢框架的承载能力、延性、初始刚度和耗能能力均显著提高。

(2)圆弧缺口构造改变了 AAC 砌体填充墙的破坏模式。对于无缺口 AAC 砌体填充墙钢框架,填充墙的 4 个角部与钢框架梁柱节点区域由于接触而产生摩擦,钢框架对填充墙产生较强的约束作用,填充墙上产生了沿对角线方向的拉(压)力带,使得填充墙角部应力集中,最终导致填充墙的整体破坏;对于带缺口 AAC 砌体填充墙钢框架,圆弧缺口构造减弱了钢框架对填充墙的约束作用,弱化了填充墙的拉(压)力带效应,延缓了墙体的破坏。

(3)圆弧缺口构造可以削弱 AAC 砌体填充墙对钢框架承载能力和刚度的贡献,同时延缓 AAC 砌体填充墙钢框架的刚度退化速率。当圆弧缺口过小时,即  $l < H/10$  时, AAC 砌体填充墙对钢框架承载能力及刚度的贡献过大, AAC 砌体填充墙钢框架的“捏拢”现象明显,结构耗能能力较差;当圆弧缺口

过大时,即  $l > H/7$  时, AAC 砌体填充墙钢框架的承载力显著降低,同时耗能能力也不能得到有效改善。根据有限元分析结果,建议圆弧缺口的弧长  $S$  为  $\pi l/2$ ,半径  $l$  为 AAC 砌体填充墙高度的  $1/10 \sim 1/7$ 。

### 参考文献:

### References:

- [1] 王元清,石永久. 多层轻型房屋钢结构的设计与应用研究[J]. 建筑结构,1999,29(6):6-8,55.  
WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu. Application and Design of Light Steel Structure[J]. Building Structure,1999,29(6):6-8,55.
- [2] SCHEUER C,KEOLEIAN G A,REPPE P. Life Cycle Energy and Environmental Performance of a New University Building: Modeling Challenges and Design Implications[J]. Energy and Buildings,2003,35(10):1049-1064.
- [3] 谷 倩,彭 波,刘肖凡. 钢框架-砌体填充墙结构三支杆模型有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2006,39(5):30-34.  
GU Qian, PENG Bo, LIU Xiao-fan. Finite Element Analysis of Three Strut Model for Masonry-infilled Steel Frames[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2006,39(5):30-34.
- [4] NEGRO P,COLOMBO A. Irregularities Induced by Nonstructural Masonry Panels in Framed Buildings [J]. Engineering Structures,1997,19(7):576-585.
- [5] 李英民,韩 军,田启祥,等. 填充墙对框架结构抗震性能的影响[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(3):51-58.  
LI Ying-min, HAN Jun, TIAN Qi-xiang, et al. Study on Influence of Infilled Walls on Seismic Performance of RC Frame Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2009,29(3):51-58.
- [6] 田志昌,韩建忠,朱梅生. 耗能框架填充墙的设计和实验[J]. 包头钢铁学院学报,1997,16(4):294-298.  
TIAN Zhi-chang, HAN Jian-zhong, ZHU Mei-sheng. Design and Experiment of Energy Dissipating Wall Filled in Frames[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology,1997,16(4):294-298.
- [7] 梅 黎. 双功能带缝填充墙[J]. 科技信息,2009(28):332-333,335.  
MEI Li. Double Function Infilled Wall with Slits[J]. Science & Technology Information,2009(28):332-333,335.
- [8] 周 云,彭水淋,郭阳照,等. 提高框架填充墙结构抗震性能的新途径和新方法[J]. 防灾减灾工程学报,

- 2011,31(5):469-476.
- ZHOU Yun, PENG Shui-lin, GUO Yang-zhao, et al. New Ways and Methods to Improve the Seismic Performance of Frame Structures with Infilled Walls[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5): 469-476.
- [9] 唐兴荣, 刘利花, 周振轶, 等. 带竖缝砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 84-93.
- TANG Xing-rong, LIU Li-hua, ZHOU Zhen-yi, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Slitted Masonry In-filled Reinforced Concrete Frame Structure[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 84-93.
- [10] 李艳艳, 陈艳凤, 韩红霞, 等. 带缝填充墙框架结构抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(2): 14-17, 23.
- LI Yan-yan, CHEN Yan-feng, HAN Hong-xia, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Infilled Frame Structures with Slit[J]. Industrial Construction, 2013, 43(2): 14-17, 23.
- [11] JIANG H J, LIU X J, MAO J J. Full-scale Experimental Study on Masonry Infilled RC Moment-resisting Frames Under Cyclic Loads [J]. Engineering Structures, 2015, 91: 70-84.
- [12] SUN G H, HE R Q, GU Q, et al. Cyclic Behavior of Partially-restrained Steel Frame with RC Infill Walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1821-1834.
- [13] SUN G H, GU Q, LI Q C, et al. Experimental and Numerical Study on the Hysteretic Behavior of Composite Partially Restrained Steel Frame-reinforced Concrete Infill Walls with Vertical Slits[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(3): 1245-1272.
- [14] YUEN T Y P, ZHANG H H, KUANG J S, et al. Shake Table Tests on RC Frame Infilled by Slitted Masonry Panels[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(9): 4027-4052.
- [15] 郁有升, 梅 灿, 雷 鸣, 等. CCA 内嵌 EPS 混凝土填充墙钢框架结构受力性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6): 89-98.
- YU You-sheng, MEI Can, LEI Ming, et al. Experimental Study and Finite Element Analysis on Mechanical Performance of Steel Frame with CCA and EPS Concrete Walls[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(6): 89-98.
- [16] 郁有升, 雷 鸣, 梅 灿. I 型缝 CCA 板填充墙钢框架试验和有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(1): 36-44.
- YU You-sheng, LEI Ming, MEI Can. Experimental Study and Finite Element Analysis on the Mechanical Properties of I-Shaped CCA Sheets In-filled Steel Frame Structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(1): 36-44.
- [17] 王玉钊, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- WANG Yu-zhuo, FU Chuan-guo. Structural Engineering Analysis and Example Explanation of ABAQUS[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [18] 刘鑫宇. 钢框架梁柱“上焊下栓”节点抗震性能试验及有限元研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- LIU Xin-yu. Experimental and Finite Element Study on Seismic Behavior of the “Upper Flange Welded-lower Flange Bolted” Beam-column Connection[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [19] 朱伯龙. 砌体结构设计原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1991.
- ZHU Bo-long. Design Principle of Masonry Structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1991.
- [20] Seismic Provisions for Structural Steel Buildings; ANSI/AISC 341-10[S]. Chicago: AISC, 2012.
- [21] 梅 灿. X 型 CCA 板填充墙钢框架试验及有限元研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2017.
- MEI Can. Experimental Study and Finite Element Analysis of Steel Frame with “X” CCA Walls[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2017.