

核心单元开孔对新型铝合金内芯屈曲约束支撑性能影响分析

李帼昌,张洪恩,杨志坚,刘雨鑫

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 提出一种新型铝合金内芯屈曲约束支撑(PALB),研究核心板开孔对PALB耗能性能的影响.方法 采用ABAQUS有限元软件对4组20个PALB构件进行滞回耗能分析,通过对比各构件的滞回曲线、骨架曲线、耗能系数等,分析构件在核心单元开孔形状、横向开孔率、纵向开孔率、开孔排数等因素下的耗能性能.结果 核心单元开长条形孔时,支撑可以获得较好的耗能能力及变形特征;支撑耗能随着核心单元横向开孔率的减小而提高;当核心单元纵向开孔率在20%~50%时,支撑耗能随着核心单元纵向开孔率的增加而提高;支撑核心单元横向开双排孔相比开单排孔性能略有提高;核心单元纵向开孔数在5~9时,支撑耗能性能最佳.结论 核心板开孔不仅可以降低支撑端部因应力集中而破坏的风险,而且更有利于支撑耗能性能的发挥.

关键词 铝合金;屈曲约束支撑;滞回性能;开孔形状;开孔率;开孔排数

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Analysis on Performance of New Aluminum Alloy Core Buckling-Restrained Braces Under Different Hole Fraction of Core Plate

LI Guochang, ZHANG Hong'en, YANG Zhijian, LIU Yuxin

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: A new type of aluminum alloy inner core buckling-restrained braces (PALB) was proposed and the influence of the opening of the core on the energy dissipation performance of PALB was studied. The ABAQUS finite element software was used to analyze the hysteretic energy dissipation of 4 groups of 20 PALB members, by comparing the hysteretic curves, skeleton curves and energy dissipation coefficients of each member, and the influence of the core unit hole shape, transverse hole fraction, longitudinal hole fraction and number of hole row on its performance was studied. The results showed that the BRB can obtain good energy dissipation capability and deforma-

收稿日期:2018-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51178276);辽宁省重点研发指导计划项目(jytcy201801)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,博士研究生导师,主要从事结构抗震等方面研究.

tion characteristic when the core unit opens a long hole, and the BRB energy dissipation performance increases with the decrease of the transverse hole fraction of core unit; As the core unit longitudinal hole fraction is between 20% ~ 50%, the BRB energy dissipation performance increases with the increase of the longitudinal hole fraction of core unit. The performance of BRB with double-row holes in core unit is slightly higher than that of single-row holes. When the number of longitudinal holes in core unit is between 5 and 9, the energy dissipation in the BRB is the best. The core plate opening can not only reduce the risk of failure of the BRB end due to stress concentration, but also is advantageous to the BRB energy dissipation performance.

Key words: aluminum alloy; buckling-restrained braces; hysteresis performance; hole shape; hole fraction; number of hole row

屈曲约束支撑作为一种优良的耗能减震构件,目前已在各大建筑工程中得到充分应用^[1-4].传统的屈曲约束支撑大都采用低屈服点钢材作为耗能内芯,随着国内外学者对屈曲约束支撑研究的深入,铝合金及铝镁合金等常用的低屈服点金属也逐渐被应用于耗能减震领域,并取得了理想的耗能减震效果^[5-9].

未开孔的核心单元在循环荷载加载时,端部容易首先断裂,不利于核心单元耗能区充分耗能,周云团队提出了“通过削弱核心单元耗能区来加强核心单元其他部位”及“定点屈服”的理念^[10-11].近年来核心单元开孔越来越多地被应用到屈曲约束支撑中^[12-13],但关于核心单元开孔的研究还是相对较少.笔者提出了一种新型铝合金内芯屈曲约束支撑,利用 ABAQUS 软件研究核心单元开孔对支撑性能的影响.研究表明,核心单元开孔可以很好地降低支撑端部应力集中现象,开孔后的核心单元能够达到全截面屈服,使支撑充分耗能.

1 有限元模型

1.1 新型铝合金内芯屈曲约束支撑的构造

新型铝合金内芯屈曲约束支撑,包括一字型耗能内芯平板,内芯上下两侧平行放置的槽形约束板,内芯左右两侧平行放置的矩形垫板,其中槽形约束板和矩形垫板通过高强螺栓相连接,核心板端部有四角钢作为加

劲肋,角钢、核心板之间通过高强螺栓连接,最终支撑两端呈十字形,以方便支撑与框架的连接,核心单元与约束单元未直接接触,之间保留一定间隙,以方便反复荷载下核心板的横向变形,其构造如图 1 所示.

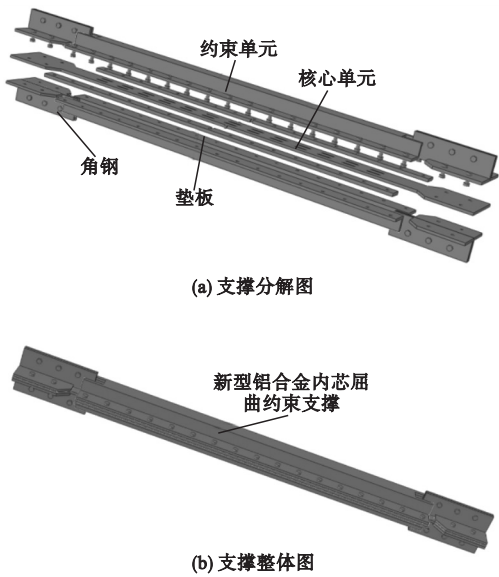


图 1 新型铝合金内芯屈曲约束支撑的构造

Fig.1 Construction of new aluminum alloy core buckling-restrained brace

1.2 模型设计

各构件约束单元与核心单元主要参数相同,核心板长宽厚分别为 2 015 mm、100 mm、10 mm;槽形约束板长宽厚分别为 1 500 mm、200 mm、10 mm;矩形垫板长宽厚分别为 1 500 mm、48 mm、12 mm,核心单元与约束单元间距离为 1 mm,螺栓间距为 90 mm. 构件主要参数见表 1.

表 1 构件主要参数

Table 1 Main parameters of the specimen

模型编号	开孔形式	开孔参数/mm	孔布置
PALB-1	—	—	—
PALB-2	边缘开槽	$A=274, B=5$	横向 1/纵向 3
PALB-3	长方形	$W=274, L=10$	横向 1/纵向 3
PALB-4	椭圆形	$a=87, b=10$	横向 1/纵向 3
PALB-5	圆形	$R=29.5$	横向 1/纵向 3
PALB-6	长条形	$r=5, I=266$	横向 1/纵向 3
PALB-7	长条形	$r=2.5, I=266$	横向 1/纵向 3
PALB-8	长条形	$r=7.5, I=266$	横向 1/纵向 3
PALB-9	长条形	$r=10, I=266$	横向 1/纵向 3
PALB-10	长条形	$r=5, I=48$	横向 1/纵向 3
PALB-11	长条形	$r=5, I=96$	横向 1/纵向 3
PALB-12	长条形	$r=5, I=144$	横向 1/纵向 3
PALB-13	长条形	$r=5, I=192$	横向 1/纵向 3
PALB-14	长条形	$r=5, I=240$	横向 1/纵向 3
PALB-15	长条形	$r=2.5, I=192$	横向 2/纵向 3
PALB-16	长条形	$r=2.5, I=115.2$	横向 2/纵向 5
PALB-17	长条形	$r=2.5, I=82$	横向 2/纵向 7
PALB-18	长条形	$r=2.5, I=64$	横向 2/纵向 9
PALB-19	长条形	$r=2.5, I=52$	横向 2/纵向 11
PALB-20	长条形	$r=2.5, I=44$	横向 2/纵向 13

注:边缘开槽削弱形式: A 为开槽长度, B 为开槽宽度;
长方形削弱形式: W 为开孔宽度, L 为开孔长度;椭圆形开
孔形式: a 与 b 分别表示椭圆长半轴长与短半轴长;圆形削
弱形式: R 为开孔半径;长条形削弱形式: r 为长条形开孔端
部圆弧半径, I 为开孔长度。

表 2 核心单元材料参数

Table 2 Material parameters of core unit

σ_0 /MPa	Q_∞ /MPa	b	C_1 /MPa	γ_1	C_2 /MPa	γ_2	C_3 /MPa	γ_3	C_4 /MPa	γ_4
142.5	84.03	8.98	657	0	2 887	359	3 485	337	4 343	336

注: σ_0 为等效塑性应变为零时的应力; Q_∞ 为屈服面最大变化值; b 为屈服面尺寸随着塑性应变发展的变化幅度;
 $C_{k,k=1-4}$ 为初始随动强化模量; $\gamma_{k,k=1-4}$ 为控制随动强化模量随塑性变形的降低率。

2.2 定义接触

为便于模型的收敛和分析,核心单元与
约束单元间法向采用硬接触,切向为无摩擦
接触^[17],勾选有限滑移公式^[18];构件中螺栓
主要受拉且数量较多,为了方便螺栓与构件
的接触,采用程序自带的 Embedded 功能将
螺栓嵌入约束板及垫板中。

2 有限元模型的建立

2.1 材料本构及单元的选择

模型核心单元为 A5083 铝合金,采用文
献[14]提出的混合强化本构,材料参数见表
2. 模型中约束单元、垫板及加劲板为 Q345
钢材,弹性模量取 206 000 MPa;模型中使用的
螺栓为 8.8 级高强螺栓,弹性模量为
210 000 MPa;A5083 铝合金及 Q345 钢材泊
松比均为 0.3. 因构件在正常情况下除核心
单元外的其他构件很难达到屈服,所以约束
单元、垫板及加劲板仅定义了弹性段. 模型中
螺栓采用一阶三维梁单元(B31)模拟,其他
部件采用三维实体单元(C3D8R),取构件长
度的 1/1 000 为模型初始缺陷^[15-16],有限元
模型如图 2 所示。

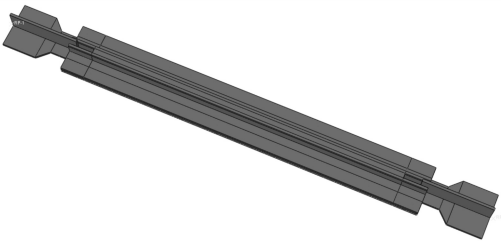


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element mode

2.3 加载制度与边界条件

为方便构件模拟及分析,采用位移控制
进行单周加载^[19],以核心单元屈服位移 Δb_y
的倍数进行施加,加载幅值分别为 Δb_y 、
 $2\Delta b_y$ 、 $4\Delta b_y$ 、 $8\Delta b_y$ 、 $12\Delta b_y$,加载制度见图 3. 支
撑两端各耦合一点,在一耦合点施加固定约
束,在另一耦合点施加位移及约束轴向以外

的运动.

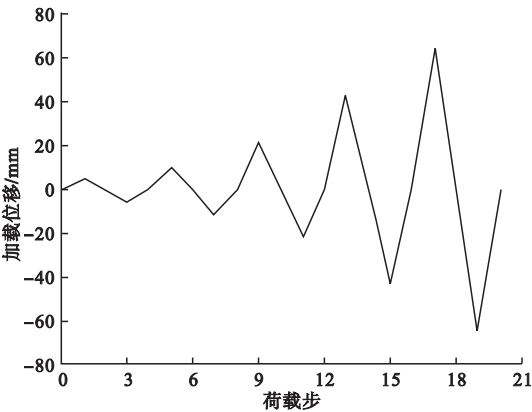


图3 加载制度
Fig. 3 The loading regime

3 有限元结果分析

当核心单元应力没有超过 155 MPa 的屈服应力时,支撑无法进入耗能状态,当核心单元应力在 155 ~ 315 MPa 时,支撑进入耗能状态,当核心单元应力超过 315 MPa 的极限应力时,支撑破坏无法继续耗能,约束单元部件应保持弹性状态,其应力不应超过 345 MPa (屈服应力). 图 4 为典型构件 PALB - 17 的荷载 - 位移滞回曲线. 从图中可以看出,滞回曲线整体饱满,耗能性能稳定. 图 5 为典型构件 PALB - 17 的荷载 - 位移骨架曲线. 从图中可以看出,骨架曲线呈上升状态,支撑整体受力性能良好. 图 6 为典型构件 PALB - 7 的核心单元应力云图和变形特征图. 从图中可以看出,核心单元受压进入多波屈曲阶段,因核心单元耗能区已进行开孔处理,核心单元端部应力相对较小,有助于核心单元的充分耗能,核心单元受力性能较好. 图 7 为典型构件 PALB - 17 的约束单元应力云图和变形特征图. 从图中可以看出,约束单元槽部应力相对较大,但整体应力均没有超过 100 MPa,约束单元可较好地约束核心单元. 由以上分析可知,新型铝合金内芯屈曲约束支撑耗能效果较好,是一种优异的耗能构件.

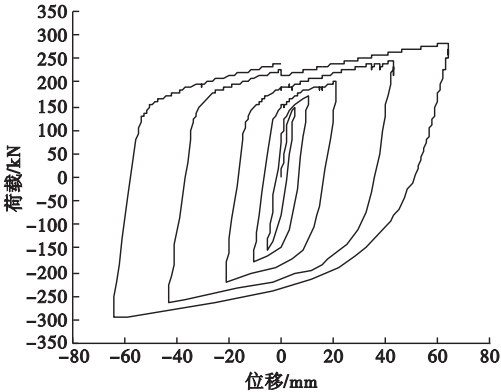


图4 PALB - 17 滞回曲线
Fig. 4 Hysteresis curve of PALB-17

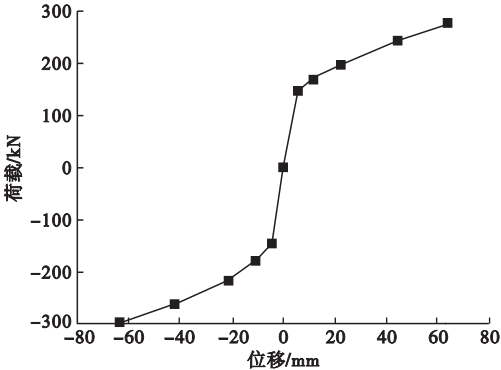


图5 PALB - 17 骨架曲线
Fig. 5 Skeleton curve of PALB-17

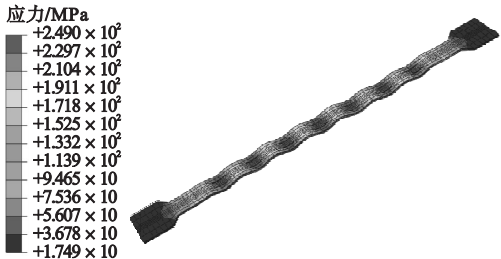


图6 PALB - 17 核心单元应力云图和变形特征
Fig. 6 Stress plot and deformation features about the core of PALB-17

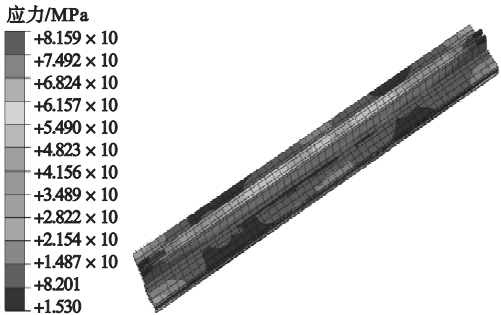


图7 PALB - 17 约束单元应力云图和变形特征
Fig. 7 Stress plot and deformation features about the restraining member of PALB-17

4 参数分析

4.1 核心单元开孔形状对支撑性能的影响

图8为构件PALB-1~PALB-6的荷载-位移滞回曲线.由图可知,新型铝合金内芯屈曲约束支撑在各削弱形式下滞回环均饱满,均有着良好的耗能效果.其中PALB-5滞回环相对其他构件较小,滞回曲线出现了较大的收缩,滞回耗能效果不如其他构件;PALB-1因未开孔削弱,滞回环面积最大,耗能效果最佳.

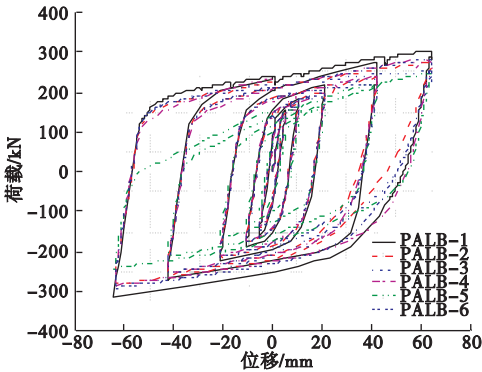


图8 PALB-1 ~ PALB-6 滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of PALB-1 ~ PALB-6

图9为构件PALB-1~PALB-6的荷载-位移骨架曲线.由图可知,各开孔形状新型铝合金内芯屈曲约束支撑骨架曲线均呈上升趋势,承载力没有出现下降的情况,其中构件PALB-1承载力最高,构件PALB-5承载力最小,构件PALB-3在受压段后期增长速度开始放缓,其余各构件曲线基本重合,受力性能较好.

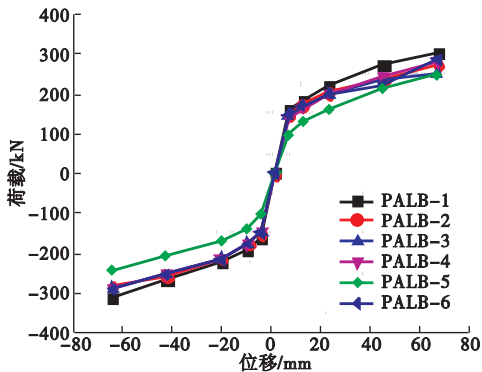


图9 PALB-1 ~ PALB-6 骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of PALB-1 ~ PALB-6

图10为PALB-1~PALB-6核心单元耗能区端部应力沿轴向分布.由图可知,构件PALB-1整体应力较大,构件PALB-3应力沿核心单元纵向增长较快,在距离核心板过渡区约175 mm的位置应力增长到最大,构件PALB-5整体应力平稳且较小,其余构件应力分布比较类似;与未开孔的PALB-1构件相比,均降低了核心单元耗能区端部应力.

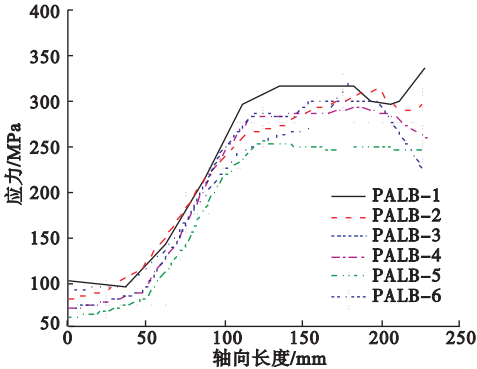


图10 PALB-1 ~ PALB-6 核心单元耗能区端部应力沿轴向分布图

Fig. 10 The axial distribution of the end stress in the energy dissipation zone of the PALB-1 ~ PALB-6 core

PALB-1~PALB-6各构件基本性能参数见表3.由表可知,构件PALB-5耗能系数及等效黏滞阻尼比最小,主要是在相同的削弱面积下,圆形开孔横向削弱程度最大,导致开孔区应力及变形均较大,耗能能力不佳;构件PALB-1因没有开孔削弱,耗能系数及等效黏滞阻尼比最大;开孔构件中PALB-3及PALB-6耗能系数及等效黏滞阻尼比较大,耗能性能较好.各构件拉压不均匀系数均没有超过文献[19]规定的1.3.

表3 PALB-1 ~ PALB-6 基本性能参数

Table 3 The fundamental parameters of PALB-1 ~ PALB-6			
型号	耗能系数	等效黏滞阻尼比	拉压不均匀系数
PALB-1	2.848	0.453	1.022
PALB-2	2.722	0.433	1.037
PALB-3	2.798	0.445	1.148
PALB-4	2.723	0.433	1.019
PALB-5	2.349	0.374	1.020
PALB-6	2.780	0.442	1.029

综上所述,当核心单元开长条形孔时,支撑滞回耗能效果较好,承载力较高,可较好地降低核心单元耗能区端部应力,因此建议新型铝合金内芯屈曲约束支撑核心单元开孔形式采用长条形。

4.2 核心单元开孔宽度对支撑性能的影响

图 11 为构件 PALB-6~PALB-9 的荷载-位移滞回曲线。由图可知,构件 PALB-8、PALB-9 滞回曲线出现了较大的收缩,滞回环面积较小;构件 PALB-6、PALB-7 滞回曲线呈梭形,滞回环饱满,耗能能力较强。

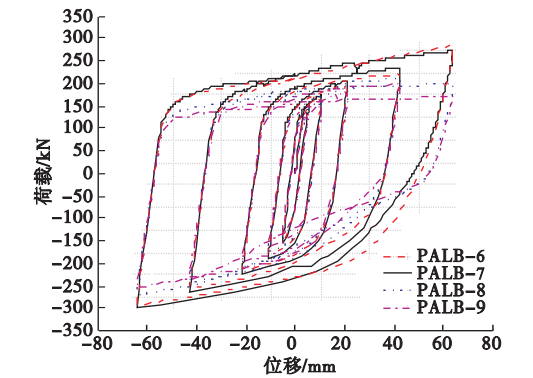


图 11 PALB-6~PALB-9 滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curves of PALB-6 ~ PALB-9

图 12 为构件 PALB-6~PALB-9 的荷载-位移骨架曲线。由图可知,构件 PALB-6、PALB-7 在受力过程中承载力一直在上升,有着较好的受力性能;构件 PALB-8、PALB-9 在受压位移较大时,承载力开始下降。

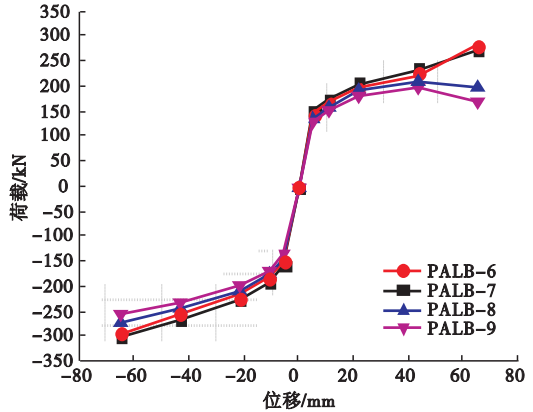


图 12 PALB-6~PALB-9 骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves of PALB-6 ~ PALB-9

构件 PALB-6~PALB-9 基本性能参数见表 4。由表可知,随着核心单元横向开孔率的增加,支撑耗能系数和等效黏滞阻尼比不断减小,耗能能力有所降低,其中构件 PALB-8、PALB-9 耗能系数较低,且拉压不均匀系数均超过了 1.3,不满足规范要求。

表 4 PALB-6~PALB-9 基本性能参数
Table 4 The fundamental parameters of PALB-6 ~ PALB-9

型号	耗能系数	等效黏滞 阻尼比	拉压不均匀 系数
PALB-7	2.805	0.446	1.098
PALB-6	2.780	0.442	1.029
PALB-8	2.728	0.434	1.360
PALB-9	2.658	0.423	1.485

综上所述,当新型铝合金内芯屈曲约束支撑横向开孔率不大于 10% 时,支撑有着较好的滞回耗能及受力性能,因此建议核心单元横向开孔率取 10% 以内。

4.3 核心单元开孔长度对支撑性能的影响

图 13 为构件 PALB-6、PALB-10~PALB-14 荷载-位移滞回曲线。从图中可知,支撑在不同开孔削弱长度下滞回环均饱满,均有着良好的耗能效果。

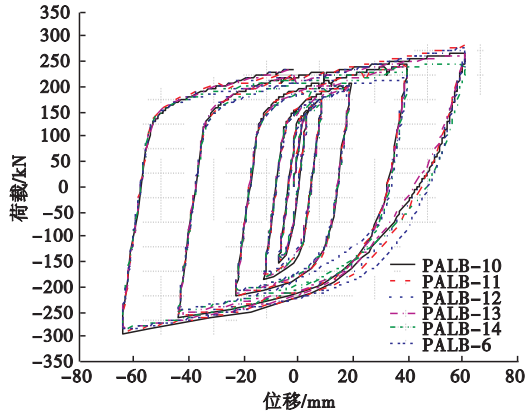


图 13 PALB-6、PALB-10~PALB-14 滞回曲线
Fig. 13 Hysteresis curves of PALB-6 and PALB-10 ~ PALB-14

图 14 为构件 PALB-6、PALB-10~PALB-14 荷载-位移骨架曲线。由图可知,

各构件骨架曲线几乎重合,承载力均呈上升趋势,受力性能较好,其中构件 PALB-14 在受压过程中,承载力相对较小,骨架曲线相对平缓;构件 PALB-6 骨架曲线在受压的最初阶段承载力相对较小,当受压位移较大时,承载力开始大幅增加。

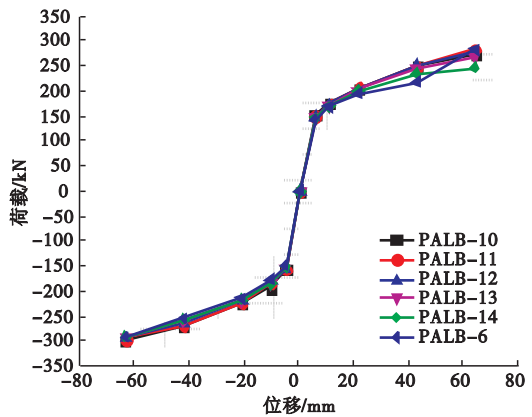


图 14 PALB-6、PALB-10 ~ PALB-14 骨架曲线

Fig. 14 Skeleton curves of PALB-6、PALB-10 ~ PALB-14

PALB-6、PALB-10 ~ PALB-14 各构件基本性能参数见表 5。由表可知,当核心单元纵向开孔率在 20% ~ 50% 时,支撑耗能系数和等效黏滞阻尼比随着核心单元纵向开孔率的增加而增加,当核心单元纵向开孔率超过 50% 后,支撑耗能系数和等效黏滞阻尼比开始下降,各构件拉压不均匀系数均没有超过 1.3。

表 5 PALB-6、PALB-10 ~ PALB-14 基本性能参数

Table 5 The fundamental parameters of PALB-6、PALB-10 ~ PALB-14

型号	耗能系数	等效黏滞 阻尼比	拉压不均匀 系数
PALB-10	2.755	0.439	1.100
PALB-11	2.746	0.437	1.032
PALB-12	2.771	0.441	1.055
PALB-13	2.778	0.442	1.079
PALB-14	2.787	0.444	1.174
PALB-6	2.780	0.442	1.029

综上所述,为了使新型铝合金内芯屈曲约束支撑获得更好的耗能效果,建议核心单元纵向开孔率取 30% ~ 55%。

4.4 核心单元开孔排数对支撑性能的影响

图 15 为构件 PALB-13、PALB-15 的荷载 - 位移滞回曲线。从图可知,构件 PALB-13、PALB-15 滞回曲线均比较饱满,滞回耗能性能相当。图 16 为构件 PALB-15 ~ PALB-20 的荷载 - 位移滞回曲线。从图中可以看出,各构件滞回曲线比较接近,滞回环饱满,耗能性能较好。

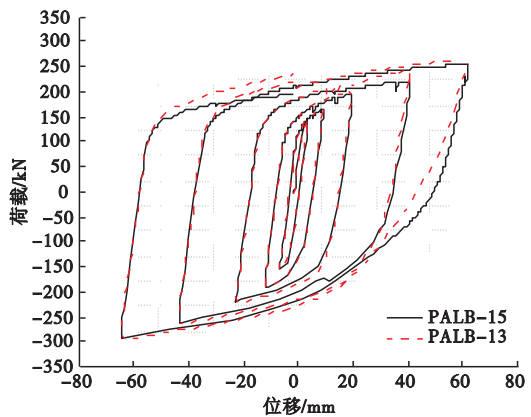


图 15 PALB-13、PALB-15 滞回曲线

Fig. 15 Hysteresis curves of PALB-13 and PALB-15

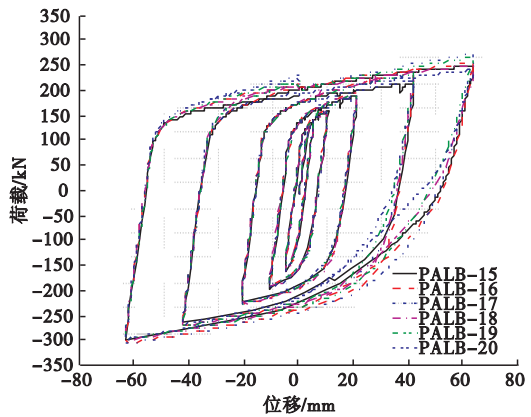


图 16 PALB-15 ~ PALB-20 滞回曲线

Fig. 16 Hysteresis curves of PALB-15 ~ PALB-20

图 17 为构件 PALB-13、PALB-15 荷载 - 位移骨架曲线。从图中可以看出, PALB-13、PALB-15 受力过程中承载力比较接近,在受压时, PALB-13 承载力略高于 PALB-15。图 18 为构件 PALB-15 ~

PALB-20 荷载-位移骨架曲线. 从图可知, 各构件骨架曲线比较接近, 在受压过程中, PALB-17、PALB-19 承载力相对较高, PALB-15、PALB-20 承载力相对较低, 各构件均有着较好的承载能力.

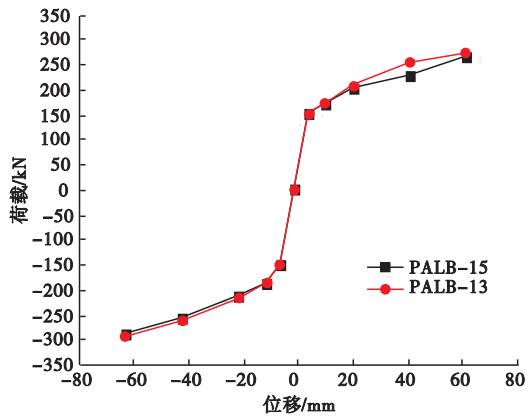


图 17 PALB-13、PALB-15 骨架曲线
Fig. 17 Skeleton curves of PALB-13 and PALB-15

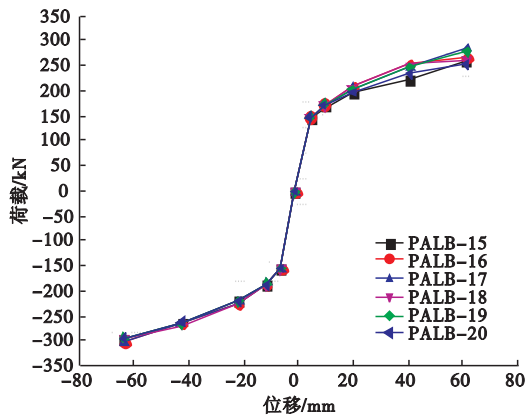


图 18 PALB-15 ~ PALB-20 骨架曲线
Fig. 18 Skeleton curves of PALB-15 ~ PALB-20

PALB-13、PALB-15 ~ PALB-20 基本性能参数见表 6. 从表可知, 核心单元横向开单排孔的 PALB-13 耗能系数和等效黏滞阻尼比不如开双排孔的 PALB-15 高, 当核心单元纵向开孔排数增加时, 构件耗能系数及等效黏滞阻尼比不断减小, PALB-15 ~ PALB-18 各构件耗能系数均达到了 2.8 及以上, PALB-20 因开孔个数最多, 使得核心单元削弱面积相对增加, 耗能系数降到了 2.7 以内, 各构件拉压不均匀系数均没有超过 1.3.

表 6 PALB-13、PALB-15 ~ PALB-20 基本性能参数

型号	耗能系数	等效黏滞 阻尼比	拉压不均匀 系数
PALB-13	2.778	0.442	1.079
PALB-15	2.805	0.446	1.115
PALB-16	2.852	0.454	1.113
PALB-17	2.802	0.446	1.045
PALB-18	2.800	0.446	1.113
PALB-19	2.743	0.437	1.043
PALB-20	2.665	0.424	1.145

综上所述, 为了使新型铝合金内芯屈曲约束支撑获得更好的承载力及滞回耗能性能, 建议支撑核心单元横向开双排孔, 纵向开孔数量控制在 5 ~ 9.

5 结 论

- (1) 新型铝合金内芯屈曲约束支撑 PALB 滞回曲线饱满, 承载力稳定, 耗能效果优异.
- (2) 当支撑核心单元开长条形孔时, 支撑可以获得更好的受力性能及滞回耗能; 核心单元横向开孔率不大于 10% 时, 支撑有着较好的滞回耗能及受力性能; 核心单元纵向开孔率在 30% ~ 55% 时, 支撑受力性能和滞回耗能性能较好; 核心单元横向开双排孔时, 耗能能力更强; 核心单元纵向开孔数在 5 ~ 9 时, 耗能能力更强.

参考文献

[1] 张永亮, 冯鹏飞, 董阳, 等. 防屈曲支撑在桥梁工程减震体系中的应用现状[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(6): 50-55.
(ZHANG Yongliang, FENG Pengfei, DONG Yang, et al. Application review on buckling-restrained brace in damping system of the bridge engineering[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2017, 39(6): 50-55.)

[2] 刘国银. 屈曲约束支撑在深圳第二高级技校抗震加固工程中的应用[J]. 工业建筑, 2017,

- 47(1):180-183.
(LIU Guoyin. Application of buckling restrained braces in aseismic retrofitting project of shenzhen second senior technical school[J]. Industrial construction, 2017, 47(1):180-183.)
- [3] 朱飞飞,肖亚明. 屈曲约束支撑在钢框架办公楼抗震加固中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(6):96-101.
(ZHU Feifei, XIAO Yaming. Application of BRBs in seismic reinforcement of steel frame structure office building[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2016, 38(6):96-101.)
- [4] AIKEN I, KIMURA I. The use of buckling-restrained braces in the United States[C]//Proceedings of the japan passive control symposium, Yokohama: Tokyo Institute of Technology, 2001.
- [5] DEMATTEIS G, BRANDO G, MAZZOLANI F M. Pure aluminium: an innovative material for structural applications in seismic engineering[J]. Construction and building materials, 2012, 26(1):677-686.
- [6] USAMI T, WANG C L, FUNAYAMA J. Developing high-performance aluminum alloy buckling-restrained braces based on series of low-cycle fatigue tests[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2012, 41(4):643-661.
- [7] WANG C L, USAMI T, FUNAYAMA J, et al. Low-cycle fatigue testing of extruded aluminium alloy buckling-restrained braces[J]. Engineering structures, 2013, 46:294-301.
- [8] FUNAYAMA J, IMASE F, USAMI T, et al. Low-cycle fatigue properties of a type of aluminium alloy buckling-restrained braces[J]. Journal of structure engineering, 2012, 58:448-458.
- [9] 徐鹏. 镁合金消能支撑的应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
(XU Peng. The research on the application of buckling-restrained brace made of magnesium alloy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.)
- [10] 周云. 防屈曲耗能支撑结构设计与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
(ZHOU Yun. Design and applications of structures with buckling-restrained braces[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.)
- [11] 周云, 龚晨, 陈清祥, 等. 开孔钢板装配式屈曲约束支撑减震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8):101-107.
(ZHOU Yun, GONG Chen, CHEN Qingxiang, et al. Experimental study on seismic performance of perforated steel-plate assembled buckling-restrained brace[J]. Journal of building structures, 2016, 37(8):101-107.)
- [12] 张浩飞. 开孔十字型全钢防屈曲支撑抗震性能与设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
(ZHANG Hao-fei. Study on seismic behavior and design method of all-steel buckling-restrained brace with perforated cruciform section[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
- [13] 张东彬, 潘鹏, 王萌资, 等. 开长孔式叠层钢管屈曲约束支撑试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(12):9-15.
(ZHANG Dongbin, PAN Peng, WANG Mengzi, et al. Experimental study on performance of a buckling-restrained brace consisting of three steel tubes with slotted holes in the middle tube[J]. China civil engineering journal, 2016, 49(12):9-15.)
- [14] 贾斌, 张其林, 赖伟, 等. 循环荷载作用下铝合金耗能支撑本构关系[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(11):1742-1747.
(JIA Bin, ZHANG Qilin, LAI Wei, et al. Constitutive relation of aluminium alloy energy dissipation braces at cyclic loading[J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2016, 50(11):1742-1747.)
- [15] 贾斌, 张其林, 罗晓群, 等. 铝合金芯板防屈曲耗能支撑滞回性能研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8):49-57.
(JIA Bin, ZHANG Qilin, LUO Xiaoqun, et al. Study on hysteretic behavior of aluminium alloy energy dissipation braces[J]. Journal of building structures, 2015, 36(8):49-57.)
- [16] CHOU C C, CHEN S Y. Subassembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces[J]. Engineering structures, 2010, 32(8):2108-2121.
- [17] HIBBITT, KARLSSON, SORENSSEN. ABAQUS/explicit, user's manual[M]. Hibbitt: Karlsson and Sorenson Incorporated, 2001.
- [18] 石亦平, 周玉荣. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
(SHI Yiping, ZHOU Yurong. Expatiation examples of ABAQUS finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.)
- [19] American Institute of Steel Construction. Seismic provisions for structural steel buildings: ANSI / AISC 341-10[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)