

文章编号:1673-2049(2019)02-0056-08

铝合金内芯装配式屈曲约束支撑有限元分析

李帼昌,张洪恩,杨志坚,石先硕

(沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:提出了一种铝合金内芯装配式屈曲约束支撑(ALB),并以 A5083 铝合金为支撑耗能内芯设计了 4 组 19 个支撑构件,采用 ABAQUS 软件对其进行有限元分析,研究了集中耗能因子 Y_{LR} 、宽厚比、螺栓间距、核心板与约束板间间隙对支撑性能的影响。结果表明:当 $Y_{LR} < 0.75$ 时,支撑耗能性能会随着 Y_{LR} 的增加而提高,当 $Y_{LR} > 0.75$ 时,支撑耗能性能随着 Y_{LR} 的增加开始降低,当 $Y_{LR} = 0.75$ 时,支撑整体表现最佳;支撑耗能性能会随着宽厚比的增加而降低,宽厚比不超过 10 时,支撑可以获得更好的耗能能力;螺栓间距不宜过大,通过控制螺栓间距 L_b 与支撑核心板屈曲波长 L_w 的比值 L_b/L_w 来控制螺栓间距,当 $L_b/L_w \leq 1.5$ 时,支撑约束单元受力更加合理,可以为核心单元提供足够的约束力;核心板与约束单元之间的间隙过小时无法为核心板变形留有足够空间,间隙过大时支撑承载力会有较大降低且不稳定,间隙控制在 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 时支撑承载能力表现更佳。

关键词:有限元分析;铝合金内芯装配式屈曲约束支撑;集中耗能因子;宽厚比;螺栓间距;间隙

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

Finite Element Analysis of Aluminum Alloy Core Assembled Buckling-restrained Braces

LI Guo-chang, ZHANG Hong-en, YANG Zhi-jian, SHI Xian-shuo

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

Abstract: An aluminum alloy inner core assembled buckling-restrained braces (ALB) was proposed, and four groups and nineteen kinds of ALB by using A5083 aluminum alloy as the inner core of energy dissipation were designed, and the finite element analysis was carried out by ABAQUS software. The influences of yield length ratio Y_{LR} , width-thickness ratio, bolt spacing, gap between core plate and restraint plate on ALB performance were studied. The results show that when $Y_{LR} < 0.75$, the energy dissipation performance of the buckling-restrained brace (BRB) increases with the increase of Y_{LR} , when $Y_{LR} > 0.75$, the energy dissipation performance of the BRB begins to decrease as the Y_{LR} increases, when $Y_{LR} = 0.75$, the overall performance of the BRB is the best. The energy dissipation performance of the BRB decreases with the increase of the width-thickness ratio, when the width-thickness ratio is no more than 10, the BRB can get better energy dissipation capability. The bolt spacing should not be too large. The bolt spacing is controlled by controlling the ratio of the bolt spacing L_b to the buckling wavelength L_w of the BRB core plate. When the L_b/L_w is not more than 1.5, the force of the constraint unit is more reasonable and can provide sufficient binding force for the core unit. The gap between the core plate and the constraint unit is too small to leave enough space for the deformation of the core

收稿日期:2018-08-11

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

作者简介:李帼昌(1964-),女,辽宁昌图人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:liguochang0604@sina.com。

plate. When the gap is too large, the bearing capacity will be greatly reduced and unstable. When the gap is controlled in 0.5-2 mm, the supporting capacity performance is better.

Key words: finite element analysis; aluminum alloy core assembled buckling-restrained brace; yield length ratio; width-thickness ratio; bolt spacing; gap

0 引言

屈曲约束支撑(BRB)既是一种普通支撑,也是一种消能减震构件,在小震时,建筑物和屈曲约束支撑均处于弹性状态,这时屈曲约束支撑仅为建筑物提供刚度,功能等同于普通支撑,在设防地震或罕遇地震时,支撑开始进入塑性耗能状态,继续耗散地震能^[1]。屈曲约束支撑在建筑物中的应用不仅使建筑物拥有更好的耗能效果,而且使建筑物的构造成本也减少很多,社会效益与经济效益突出^[2-4]。目前研究比较成熟的有钢与混凝土组合的屈曲约束支撑^[5-6]和全钢防屈曲支撑^[7-8],均已被大量应用于实际工程中,前者一般自重较大,难以应用于大跨度结构,质量要求高,加工相对困难,且无法多次利用;后者构造相对简单,质量要求降低,但依然不适用于大跨度结构^[9]。

铝合金作为一种人们比较熟悉的金属,应用非常广泛^[10-11],但将铝合金作为屈曲约束支撑耗能内芯的研究与应用还非常少,目前欧洲和日本在这方面的研究取得了一些进展^[12-15],中国对其进行系统研究的少之又少^[16]。本文在相关研究的基础上,提出了一种铝合金内芯装配式屈曲约束支撑(ALB),并通过 ABAQUS 对其性能影响参数进行数值模拟。

1 模型的设计

铝合金内芯装配式屈曲约束支撑主要由耗能构件一字形铝合金核心板、约束核心板横向变形的槽形约束板、控制核心板与约束板间间隙的矩形垫板、加强核心板端部强度便于与框架连接的角形加劲板以及将各构件连为一体的高强螺栓组成,除耗能核心板采用 A5083 铝合金之外其余各构件均采用 Q345 钢材,其构造如图 1 所示,其中 L_c 为核心板耗能区长度, T 为核心板厚度, L_b 为螺栓间距。本文设计了 4 组 19 个支撑构件,研究不同集中耗能因子、宽厚比、螺栓间距、核心板与约束板间间隙对其性能的影响,各构件主要尺寸相同,核心板长度、宽度分别为 2 015,100 mm,垫板宽度为 30 mm,长度与约束板长度相同,厚度为核心板厚度与两侧间隙之和,约束板长度、宽度、厚度分别为 1 500,164,10

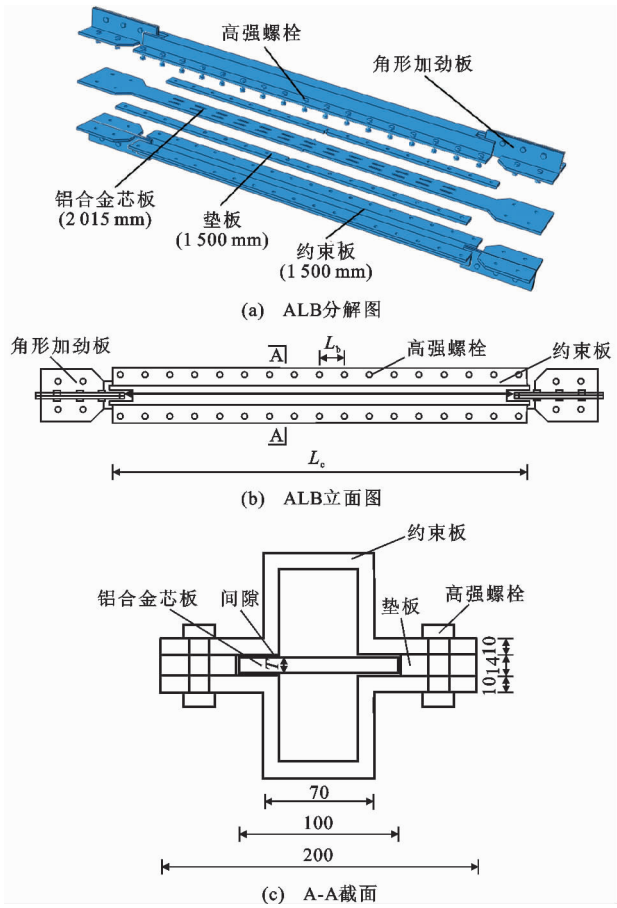


图 1 铝合金内芯装配式屈曲约束支撑的构造(单位:mm)
Fig. 1 Construction of Aluminum Alloy Core Assembled Buckling-restrained Brace (Unit:mm)

mm,长度根据集中耗能因子的变化而略有增减,各构件主要参数见表 1。

2 有限元模型的建立

2.1 材料本构与单元的选择

模型中核心板选用 A5083 铝合金,采用混合强化本构^[17]对其进行模拟,螺栓选用 8.8 级高强螺栓,约束板、垫板、加劲板均采用 Q345 钢材,各钢材构件因很难进入塑性阶段,所以仅定义了弹性阶段,铝合金及钢材的材料力学参数见表 2。除螺栓采用梁单元模拟外,其余构件均采用三维实体单元模拟。

2.2 定义接触与初始缺陷

约束板与垫板、核心板与约束板之间均采用面-面接触,其中法向为硬接触,切向为程序默认无摩

表 1 构件主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Specimens

构件编号	核心板				螺栓			间隙/mm
	L_c /mm	Y_{LR}	T /mm	宽厚比	个数	L_b /mm	L_b/L_w	
ALB-1	1 210	0.60	10.0	10.0	34	90	0.5	2.0
ALB-2	1 310	0.65	10.0	10.0	34	90	0.5	2.0
ALB-3	1 430	0.70	10.0	10.0	34	90	0.5	2.0
ALB-4	1 530	0.75	10.0	10.0	34	90	0.5	2.0
ALB-5	1 610	0.80	10.0	10.0	34	90	0.5	2.0
ALB-6	1 430	0.70	20.0	5.0	34	90	0.5	2.0
ALB-7	1 430	0.70	12.5	8.0	34	90	0.5	2.0
ALB-8	1 430	0.70	10.0	10.0	34	90	0.5	2.0
ALB-9	1 430	0.70	8.0	12.5	34	90	0.5	2.0
ALB-10	1 430	0.70	6.7	15.0	34	90	0.5	2.0
ALB-11	1 430	0.70	10.0	10.0	16	195	1.0	2.0
ALB-12	1 430	0.70	10.0	10.0	12	290	1.5	2.0
ALB-13	1 430	0.70	10.0	10.0	8	390	2.0	2.0
ALB-14	1 430	0.70	10.0	10.0	6	600	3.1	2.0
ALB-15	1 430	0.70	10.0	10.0	34	90	0.5	0.5
ALB-16	1 430	0.70	10.0	10.0	34	90	0.5	1.0
ALB-17	1 430	0.70	10.0	10.0	34	90	0.5	1.5
ALB-18	1 430	0.70	10.0	10.0	34	90	0.5	3.0
ALB-19	1 430	0.70	10.0	10.0	34	90	0.5	5.0

注: Y_{LR} 为集中耗能因子; L_w 为核心板屈曲波长, 本文模型的屈曲波长 L_w 为 193 mm。

表 2 材料力学参数

Tab. 2 Mechanical Parameters of Materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比	屈服应力/MPa
A5083	70 000	0.3	155
Q345	206 000	0.3	345

擦, 螺栓采用软件自带的 Embedded Region 选项嵌入约束板与垫板中, 以便于模型的收敛及建立。引入初始缺陷的目的是, 当核心板端部受压时, 核心板可以进入波形屈曲阶段, 有助于支撑性能的发挥, 在引入初始缺陷之前, 要先进行特征值屈曲分析, 本模型设置了前 8 阶屈曲模态, 并将第 1 阶模态乘以缺陷系数 $L/1\ 000$ (L 为核心板长度)^[16] 引入模型中, 其有限元模型如图 2 所示。

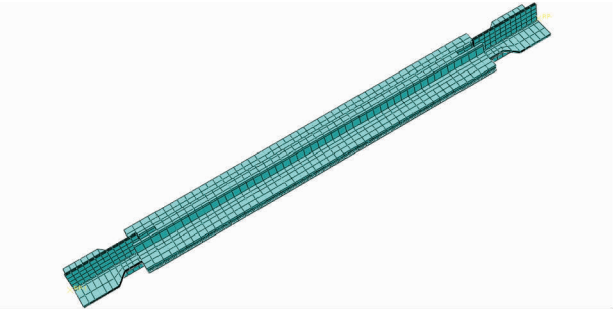


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model

2.3 边界条件与加载制度

支撑一端固定, 另一端除轴向外均固定, 边界约束施加在支撑两端的耦合点上, 采用轴向单周位移加载^[18], 加载幅值分别为 Δb_y , $2\Delta b_y$, $4\Delta b_y$, $8\Delta b_y$, $12\Delta b_y$, 其中 Δb_y 为核心板屈服位移。加载制度具体如图 3 所示。

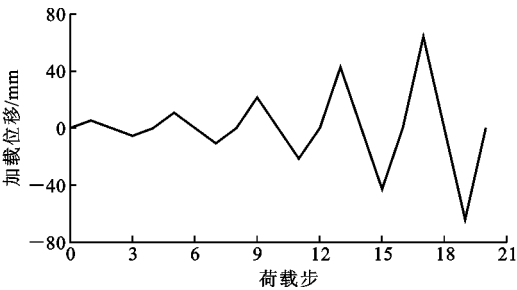


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading System

3 结果分析

3.1 集中耗能因子对支撑性能的影响

因集中耗能因子的变化会改变核心板耗能区长度, 而核心板耗能区长度与核心板的开孔大小密切相关, 根据本课题组和相关学者研究^[19] 可知, 核心板适当的开孔会提高支撑的耗能性能, 此处仅分析

集中耗能因子对支撑性能的影响,为避免开孔对支撑的影响,构件 ALB-1~ALB-5 均未进行开孔处理,其余构件均采用横向 10%、纵向 40%的开孔处理,此后不再赘述。图 4 为构件 ALB-1~ALB-5 的荷载-位移滞回曲线。从图 4 可知,各构件滞回曲线饱满,均有着较好的耗能能力,但随着集中耗能因子的变化,各构件滞回环面积略有差异,其中构件 ALB-1 滞回环面积最小,构件 ALB-3 与 ALB-5 最外圈滞回环面积相对较大。

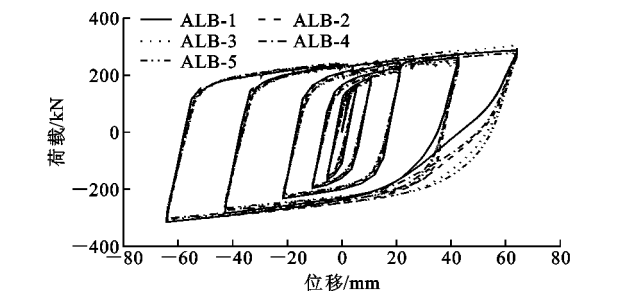


图 4 ALB-1~ALB-5 的荷载-位移滞回曲线
Fig. 4 Load-displacement Hysteresis Curves of ALB-1 to ALB-5

图 5 为构件 ALB-1~ALB-5 的荷载-位移骨架曲线。从图 5 可知,各构件承载力稳定且均呈上升趋势,构件受拉时荷载-位移骨架曲线基本重合,当构件受压时承载力出现了较小的差异,其中构件 ALB-3 承载力最大,构件 ALB-4 承载力最小,构件 ALB-2 承载力增长减缓。

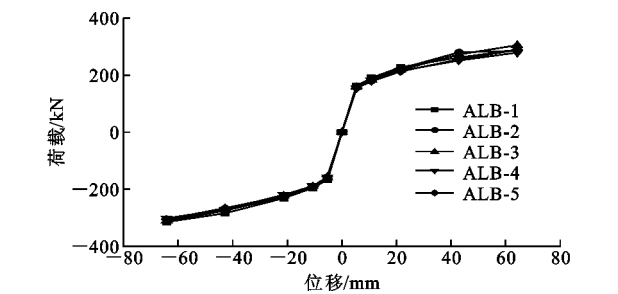


图 5 ALB-1~ALB-5 的荷载-位移骨架曲线
Fig. 5 Load-displacement Skeleton Curves of ALB-1 to ALB-5

表 3 列出了 ALB-1~ALB-5 各构件基本性能参数。由表 3 可知,从构件 ALB-1 至构件 ALB-4 支撑耗能系数和等效黏滞阻尼比逐渐增加,从构件 ALB-4 至构件 ALB-5 支撑耗能系数和等效黏滞阻尼比开始下降,构件 ALB-1 因耗能区长度相对较小,耗能能力无法充分发挥,耗能系数没有超过 2.8,构件 ALB-5 虽然耗能系数与等效黏滞阻尼比均比较大,但是在荷载加载结束后其核心板出现了强轴

表 3 ALB-1~ALB-5 基本性能参数
Tab. 3 Fundamental Performance Parameters of ALB-1 to ALB-5

构件编号	ALB-1	ALB-2	ALB-3	ALB-4	ALB-5
耗能系数	2.765	2.829	2.848	2.954	2.901
等效黏滞阻尼比	0.440	0.450	0.453	0.470	0.462
拉压不均匀系数	1.097	1.106	1.022	1.087	1.047

向的屈曲,如图 6 所示,这主要是由于耗能区长度增加后核心板长细比增加,容易产生强轴向的失稳,当核心耗能区长度相对增加后,支撑预留的端部连接区便会减小,不利于支撑与外部框架的连接,各构件拉压不均匀系数均没有超过规范^[18]规定的 1.3。



图 6 ALB-5 核心单元应力云图和变形特征(单位:MPa)
Fig. 6 Stress Nephogram and Deformation Feature About Core of ALB-5 (Unit:MPa)

综上所述,当集中耗能因子没超过 0.75 时,支撑耗能性能随集中耗能因子的增加而增加,当集中耗能因子超过 0.75 时,支撑耗能性能开始下降,且支撑更容易出现强轴向的失稳,为使支撑获得更好的耗能效果,建议 $0.65 \leq Y_{LR} \leq 0.75$ 。

3.2 宽厚比对支撑性能的影响

图 7 为构件 ALB-6~ALB-10 的荷载-位移滞回曲线。由图 7 可知,从构件 ALB-6 至构件 ALB-10 支撑滞回环面积逐渐减小,其中 ALB-5 滞回环面积相对其他构件要大得多,各构件滞回曲线均呈梭形,滞回耗能效果良好。

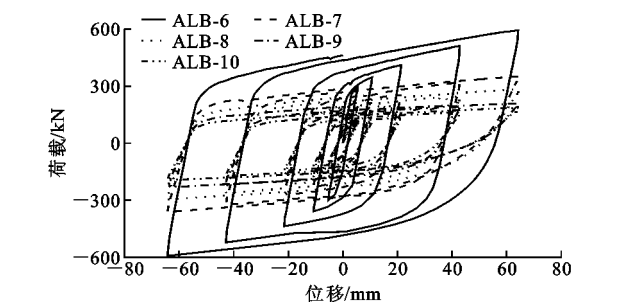


图 7 ALB-6~ALB-10 的荷载-位移滞回曲线
Fig. 7 Load-displacement Hysteresis Curves of ALB-6 to ALB-10

图 8 为构件 ALB-6~ALB-10 的应力-应变骨架曲线。由于核心板宽厚比的变化,核心板截面积

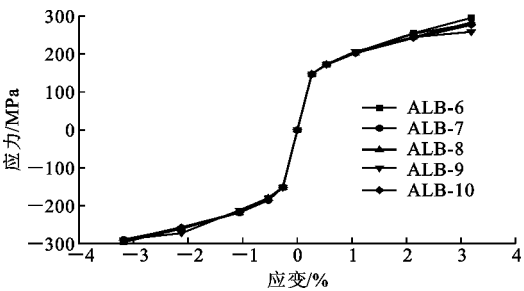


图 8 ALB-6~ALB-10 的应力-应变骨架曲线

Fig. 8 Stress-strain Skeleton Curves of ALB-6 to ALB-10

也不同,使得支撑轴力相差较大,因此以应力-应变曲线来描述支撑承载力的变化,其中应力为轴向压力与核心板截面面积之比,应变为轴向位移与核心板长度的比值。从图 8 可知,各构件承载力均比较稳定且呈上升趋势,当支撑受拉时 ALB-9 承载力略大,其他构件骨架曲线几乎重合,在支撑受压时 ALB-9 承载力最小,ALB-6 承载力最大,其余构件骨架曲线基本重合。

表 4 列出了 ALB-6~ALB-10 各构件基本性能参数。由表 4 可知,从构件 ALB-6 至构件 ALB-10 支撑耗能系数与等效黏滞阻尼比逐渐降低,当宽厚比大于 10 后,支撑耗能系数降到 2.8 以下,构件 ALB-9 拉压不均匀系数相对较大,各构件拉压不均匀系数均小于 1.3。图 9 为构件 ALB-10 的应力云图和变形特征。从图 9 可知,ALB-10 的最大应力为 322.7 MPa,已经超过了 A5083 铝合金 315 MPa 的极限应力,且由于 ALB-10 宽厚比较大、核心板厚度较小,核心板在中部发生了轻微的强轴屈曲现象,因此过大的宽厚比不利于支撑性能的发

表 4 ALB-6~ALB-10 基本性能参数

Tab. 4 Fundamental Performance Parameters of

ALB-6 to ALB-10

构件编号	ALB-6	ALB-7	ALB-8	ALB-9	ALB-10
耗能系数	2.868	2.831	2.802	2.774	2.750
等效黏滞阻尼比	0.457	0.451	0.446	0.441	0.438
拉压不均匀系数	1.001	1.035	1.045	1.122	1.050



图 9 ALB-10 核心单元应力云图和变形特征(单位:MPa)

Fig. 9 Stress Nephogram and Deformation Feature About Core of ALB-10 (Unit:MPa)

综上所述,当支撑核心板宽厚比在 5~10 之间时,支撑受力性能及滞回耗能性能均较好,当支撑宽厚比大于 10 时,支撑耗能性能开始降低且有核心板强轴向失稳的风险,因此建议铝合金内芯装配式屈曲约束支撑核心板宽厚比取 5~10。

3.3 螺栓间距对支撑性能的影响

图 10 为构件 ALB-13,ALB-14 在轴向加载位移至 $L/100$ 时的约束单元应力云图和变形特征。从图 10 可知,因 ALB-13,ALB-14 螺栓间距过大,两螺栓间的约束板产生鼓曲现象,其中构件 ALB-14 最大应力达 449.6 MPa,已经超过了 Q345 钢材的极限应力。表 5 列出了构件 ALB-8,ALB-11~ALB-14 在轴向加载位移至 $L/100$ 时的应力情况。由表 5 可知,各构件螺栓应力均没有超过屈服应力,各构件核心板均已进入屈服耗能状态且均未超过 315 MPa 的极限应力,除构件 ALB-14 外其余各构件约束板均处于弹性状态。

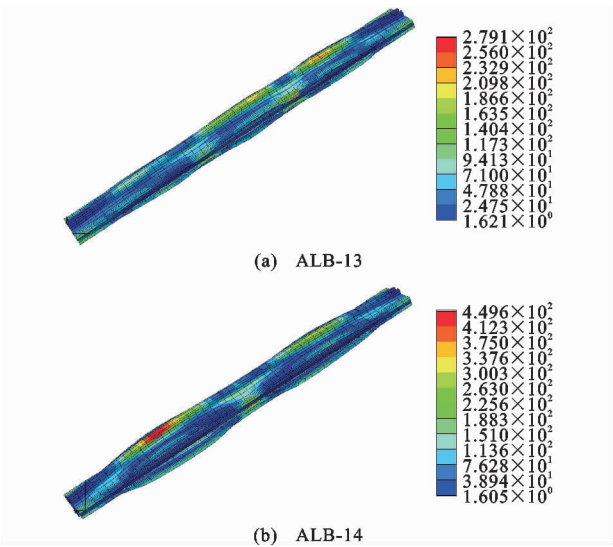


图 10 ALB-13,ALB-14 约束单元应力云图和变形特征
(单位:MPa)

Fig. 10 Stress Nephograms and Deformation Features About Restraining Members of ALB-13 and ALB-14 (Unit:MPa)

表 5 不同螺栓间距下各构件最大应力

Tab. 5 Maximum Stresses of Various Members with

Different Bolt Spacings

MPa

构件	ALB-8	ALB-11	ALB-12	ALB-13	ALB-14
核心板	242.3	235.6	239.7	258.2	266.2
约束板	76.0	108.1	127.2	279.1	449.6
螺栓	48.6	68.1	102.1	192.0	176.7

图 11 为构件 ALB-8,ALB-11~ALB-14 在轴向加载位移至 $L/100$ 时的荷载-位移曲线。从图 11 可知,构件 ALB-14 荷载-位移曲线在端部加载位移约

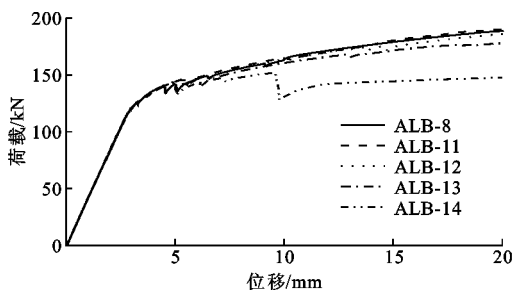


图 11 ALB-8, ALB11~ALB-14 的荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement Curves of ALB-8 and ALB-11 to ALB-14

ALB-11 to ALB-14

10 mm 时出现了较大的波动,且承载力不再随着加载位移的增加而提高,承载力最低,其余构件中 ALB-13 承载力相对其他构件略有降低,除构件 ALB-14 外各构件承载力均较稳定且呈上升趋势。

当螺栓间距增加时,约束板对螺栓的拉力也会增大,因此要对螺栓所受拉力进行验算,结果见表 6,表达式如下^[20-23]

$$t_c = \sqrt{\frac{4N_t^b e_2}{b f_y}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\rho}{2} [1 - 4(\frac{t}{t_c} - 0.5)^2] N_t \quad (2)$$

$$L_w = \frac{\pi B}{2} \sqrt{\frac{E_t}{3 f_{0.2}}} \quad (3)$$

$$N_t = \begin{cases} \frac{P_u d}{L_w/2} & L_b \leq L_w \\ \frac{P_u d L_b}{L_w^2/2} & L_b > L_w \end{cases} \quad (4)$$

$$N_t + Q < N_t^b \quad (5)$$

式中: t_c 为约束板最小厚度; b 为垫板宽度; N_t^b 为螺栓抗拉承载力; f_y 为约束板屈服强度; e_2 为螺栓中心至约束板中心的距离; Q 为约束板对螺栓产生的撬力; ρ 为螺栓中心至约束板中心距离与螺栓中心至约束板边缘距离的比值; t 为约束板厚度; N_t 为螺栓所受拉力; B 为核心板宽度; E_t 为核心板切线模量,取初始弹性模量的 1%; $f_{0.2}$ 为核心板名义屈服应力; P_u 为支撑极限承载力; d 为间隙大小。

螺栓间距的增加也会使约束板有局部失稳的风险,因此也需要对螺栓间约束板弯矩 M_c 进行验算,验算结果见表 6,验算表达式如下^[23-24]

$$M_c = \begin{cases} \frac{P_u L_b d}{L_w} \leq M_u = \gamma f_y W_z & L_b \leq L_w \\ \frac{P_u L_b^2 d}{L_w^2} \leq M_u = \gamma f_y W_z & L_b > L_w \end{cases} \quad (6)$$

式中: γ 为塑性发展系数; W_z 为抗弯截面系数。

综上所述,螺栓间距对支撑整体性能的发挥及

表 6 ALB-8, ALB-11~ALB-14 验算结果

Tab. 6 Check Results of ALB-8 and ALB-11 to ALB-14

构件编号	拉力		弯矩	
	$N_t + Q / \text{kN}$	是否满足要求	$M_c / (\text{kN} \cdot \text{m})$	是否满足要求
ALB-8	19.1	是	344.3	是
ALB-11	19.4	是	755.6	是
ALB-12	28.8	是	1 667.5	是
ALB-13	38.7	否	3 022.5	否
ALB-14	59.5	否	7 140.0	否

注:本文模型 $M_u = 2\,477 \text{ kN} \cdot \text{mm}$; $N_t^b = 36 \text{ kN}$ 。

稳定性均有较大影响,构件 ALB-14 各方面均不满足要求,ALB-13 不满足螺栓拉力及约束板弯矩要求,其余构件各方面表现均良好,即当 $L_b / L_w \leq 1.5$ 时,支撑整体表现良好,建议 $L_b / L_w \leq 1.5$ 。

3.4 间隙对支撑性能的影响

核心板与约束板间的间隙可以为核心板的横向变形留有空间,有助于支撑耗能性能的发挥。图 12 为 ALB-8, ALB-15~ALB-19 在轴向加载位移至 $L/100$ 时的荷载-位移曲线。由图 12 可知,构件 ALB-18, ALB-19 曲线非常不稳定,在荷载加载过程中出现了较大的波动,尤其是构件 ALB-19 承载力已不再提高,构件 ALB-15 在位移加载到约 8 mm 时出现了抖动现象,不过其承载力依然最大,整体表现良好,其余构件承载力依然保持上升且均较为稳定。图 13 为构件 ALB-16, ALB-19 在轴向加载位移至 $L/100$ 时的核心单元应力云图及变形特征。从图 13 可知,构件 ALB-16 核心板最大应力为 300.9 MPa,没有超过铝合金核心板的极限应力,且核心板鼓曲比较均衡,最大应力均集中在核心板开孔区域,这与核心板开孔的目的相一致;因构件 ALB-19 间隙比较大,核心板鼓曲变形较大且不均衡,核心板出现了局部应力集中现象,应力主要集中在非开孔区域,应力最大值达 352.8 MPa,已超过铝合金核心板的极限应力,除应力集中区域外,其他部位应力均较小,构件 ALB-19 受力及变形很不合理。

综上所述,为了使核心板有足够的横向变形空间,并考虑到构件加工过程中的精度问题,即约束板与核心板间间隙不宜过小;太大的间隙会降低支撑承载能力,核心板变形及受力也会不理想。为便于支撑性能的发挥,建议约束板与核心板间间隙为 0.5~2 mm。

4 结 语

(1) 铝合金内芯装配式屈曲约束支撑具有较好的承载性能及滞回耗能性能,是一种优异的消能减

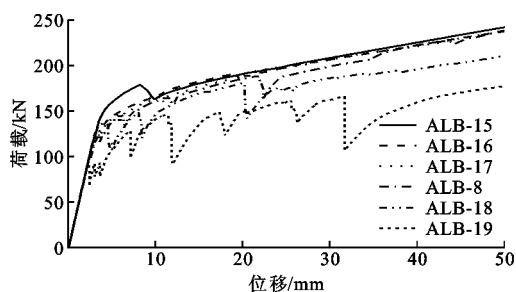


图 12 ALB-8, ALB-15~ALB-19 的荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement Curves of ALB-8 and ALB-15 to ALB-19

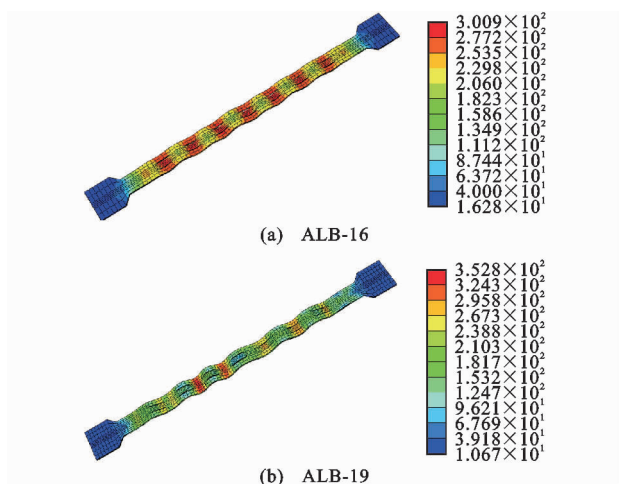


图 13 ALB-16, ALB-19 核心单元应力云图和变形特征
(单位:MPa)

Fig. 13 Stress Nephograms and Deformation Features
About Core of ALB-16 and ALB-19 (Unit:MPa)

震构件。

(2) 铝合金作为一种常见的金属,不仅质量轻、耐腐蚀,而且其滞回耗能性能也同样突出,可用于制作屈曲约束支撑耗能内芯。

(3) 当集中耗能因子满足 $0.65 \leq Y_{LR} \leq 0.75$ 时, ALB 可以获得更好的耗能效果;当 ALB 核心板宽厚比在 5~10 之间时,支撑耗能效果最佳;当螺栓间距满足 $L_b/L_w \leq 1.5$ 时,ALB 各构件受力良好,承载力稳定,有利于支撑整体性能的发挥;当约束板与核心板间间隙在 0.5~2 mm 之间时,支撑可以获得更好的承载性能及耗能性能。

参考文献:

References:

[1] 王永贵. 屈曲约束支撑及支撑框架结构抗震性能与设计方法研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2014.
WANG Yong-gui. Research on Seismic Performance and Design Method of Buckling-restrained Brace and

Brace-frame Structure[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing),2014.

- [2] 姜文伟,赵雪莲,包联进,等. 世博博物馆主体结构设计[J]. 建筑钢结构进展,2017,19(5):22-29,90.
JIANG Wen-wei, ZHAO Xue-lian, BAO Lian-jin, et al. Design of Main Structure in Expo Museum[J]. Progress in Steel Building Structures,2017,19(5):22-29,90.
- [3] 卢清刚,周祥茵,刘永豪,等. 中关村国防科技园 A 栋综合楼超限结构设计[J]. 建筑结构,2017,47(13):63-68.
LU Qing-gang, ZHOU Xiang-yin, LIU Yong-hao, et al. Out-of-code Structural Design of Complex Building A of National Defense Science and Technology Park in Zhongguancun [J]. Building Structure, 2017,47(13):63-68.
- [4] 徐自然,苏 骏,崔家春,等. 上海浦东国际机场三期扩建工程卫星厅消能减震项目抗震性能化分析[J]. 建筑结构,2017,47(12):23-28.
XU Zi-ran, SU Jun, CUI Jia-chun, et al. Seismic Performance Analysis on Energy Dissipation Satellite Hall of Shanghai Pudong International Airport Three Phase Expansion Project [J]. Building Structure, 2017,47(12):23-28.
- [5] 李国强,孙飞飞,陈素文,等. 大吨位国产 TJ II 型屈曲约束支撑的研制与试验研究[J]. 建筑钢结构进展,2009,11(4):22-26.
LI Guo-qiang, SUN Fei-fei, CHEN Su-wen, et al. Development and Experimental Study of Large-tonnage Domestic TJ II Buckling-restrained Brace [J]. Progress in Steel Building Structures,2009,11(4):22-26.
- [6] TSAI K C, WU A C, WEI C Y, et al. Welded End-slot Connection and Debonding Layers for Buckling-restrained Braces[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2014,43(12):1785-1807.
- [7] 马 宁. 全钢防屈曲支撑及其钢框架结构抗震性能与设计方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
MA Ning. Seismic Behavior and Design Method of All-steel Buckling Restrained Braces and Steel Frames [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2010.
- [8] USAMI T, GE H B, KASAI A. Overall Buckling Prevention Condition of Buckling-restrained Braces as a Structural Control Damper[C]//WCEE. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing: WCEE,2008:1-9.
- [9] 贾 斌,张其林,罗晓群,等. 新型铝合金耗能支撑屈曲约束条件研究[J]. 地震工程学报,2014,36(3):495-503.

- JIA Bin, ZHANG Qi-lin, LUO Xiao-qun, et al. Buckling Restraint Conditions for Innovative Aluminum Alloy Energy Dissipation Braces [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 495-503.
- [10] 王国军, 王祝堂. 铝合金在中国民用航空器上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(11): 1-11.
WANG Guo-jun, WANG Zhu-tang. Application of Aluminum Alloy on China's Civil Aircraft [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(11): 1-11.
- [11] 李 龙, 吕金明, 严 安, 等. 铝合金装甲材料的应用及发展[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(6): 105-113.
LI Long, LU Jin-ming, YAN An, et al. Application and Development of Aluminum Alloy Armor Materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(6): 105-113.
- [12] DE MATTEIS 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] DUSICKA P, TINKER J. Global Restraint in Ultra-lightweight Buckling-restrained Braces [J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(1): 139-150.
- [16] 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 Qi-lin, LUO Xiao-qun, et al. Study on Hysteretic Behavior of Aluminium Alloy Energy Dissipation Braces [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(8): 49-57.
- [17] 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 Qi-lin, 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.
- [18] ANSI/AISC 341-10, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings [S].
- [19] 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 Application of Buckling-restrained Braced Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [20] JGJ 82—2011, 钢结构高强度螺栓连接技术规程 [S].
JGJ 82—2011, Technical Specification for High Strength Bolt Connections of Steel Structures [S].
- [21] 陈绍蕃. 论高强度螺栓连接的分类和抗拉连接的计算 [J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(3): 1-6.
CHEN Shao-fan. On the Classification of High-strength Bolt Connections and the Calculation of Connections Subjected to Tension [J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(3): 1-6.
- [22] KOETAKA Y, BYAKUNO Y, INOUE K. Experimental Verification of Design Criteria of Knee Brace Damper [C]//ISSS. Proceedings of the 4th International Symposium on Steel Structures. Seoul: ISSS, 2006: 125-136.
- [23] 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.
- [24] 唐 荣. 新型全钢防屈曲耗能支撑的性能试验与设计方法研究 [D]. 广州: 广州大学, 2012.
TANG Rong. Performance Testing and Designing Method Study of All-metallic Buckling-restrained Brace [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012.