

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210224001

钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑性能分析*

贺拥军¹, 刘学文¹, 周绪红²

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:传统屈曲约束支撑(BRB)在多遇地震作用下通常处于弹性状态,不能耗散能量。为解决这一问题,将一字型屈曲约束支撑核心板开孔与铅芯组合,提出了一种钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑(SLBRB)。首先介绍了SLBRB的构造与工作原理;其次采用ABAQUS有限元软件对SLBRB建模进行有限元分析;最后研究了铅芯面积、铅芯布置形式和铅芯直径与核心板开孔宽度的比值(径宽比)三个关键参数对SLBRB力学性能的影响,并给出了SLBRB各关键参数的建议值。结果表明:SLBRB的构造设计合理,铅芯与核心板能够协同工作;滞回曲线饱满,分级耗能能力良好;建议铅芯面积取值应保证 F_d/F_c 小于0.229;宜采用单根铅芯布置形式;径宽比取值应小于等于1。

关键词: 屈曲约束支撑; 分级耗能; 滞回特性; 铅阻尼器

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0879-09

Performance Analysis of a Steel-lead Composite Buckling-restrained Brace with Multi-level Energy Dissipation

HE Yongjun¹, LIU Xuwen¹, ZHOU Xuhong²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Traditional buckling-restrained braces (BRBs) typically remain in an elastic state under frequent earthquakes and cannot dissipate energy. To address this issue, a steel-lead composite buckling-restrained brace with multi-level energy dissipation (SLBRB) was proposed by introducing holes in the core plate of an I-shaped BRB and combining them with lead cores. First, the structure and working principle of the SLBRB were introduced. Then, finite element analysis was conducted on the SLBRB using the ABAQUS software. Finally, the influence of three key parameters—lead core area, lead core arrangement, and the ratio of lead core diameter to core plate hole width (diameter-to-width ratio)—on the mechanical properties of the SLBRB was investigated, and recommended values for these parameters were provided. The results showed that the structural design of the SLBRB was rational, and the lead core and core plate could work synergistically. The hysteresis curves were full, indicating good multi-level energy dissipation capacity. It was recommended that the lead core area should ensure that the F_d/F_c was below 0.229. Additionally, a single lead core arrangement was preferred, and the diameter-to-width ratio should be less than or equal to 1.

Keywords: buckling-restrained brace; multi-level energy dissipation; hysteresis characteristics; lead damper

* 收稿日期:2021-02-24;修回日期:2021-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51890902,52478170)资助

作者简介:贺拥军(1970—),男,教授,博导,博士。主要从事钢结构及大跨空间结构研究。E-mail:hyj0087@163.com

0 引言

屈曲约束支撑(BRB)广泛应用于工程中,特别是作为框架结构的耗能支撑构件。在日本,M. Wakabayashi等^[1],K. Kimura等^[2],N. Mochizuki等^[3]自1973年以来就对BRB进行了开创性研究。1988年,A. Watanabe等^[4]提出第一个实用的BRB,采用填充砂浆的矩形钢管作为约束,并确定了最佳的胶凝材料,以获得稳定和对称的滞回性能。由于混凝土浇筑过程较为复杂,且需要养护,Suzuki等在1994年提出了以焊接工字型钢为核心单元,以圆钢管为外约束单元的纯钢屈曲约束支撑,并针对这种支撑开展了试验研究^[5]。然而为了避免低周疲劳失效,传统的BRB被设计为多遇地震作用下处于弹性状态不能耗散能量。

铅具有密度大,强度低,塑性高等特点;并且其低刚度和面芯立方体的结构特征,使其具有良好的延性和柔性^[6]。铅的上述特性使其在微小位移下便能进入塑性耗能状态,受力变形过程中消耗大量的能量,是减震、防震的极佳材料。当前铅阻尼器主要有以下类型:铅剪切阻尼器、铅节点阻尼器、铅挤压阻尼器和圆柱型铅阻尼器等。

传统BRB在罕遇地震作用下具有良好的耗能能力,而铅阻尼器在多遇地震作用下具有良好的耗能能力,但其剪切刚度和承载能力有限。本文将一字型屈曲约束支撑核心板开孔与铅芯组合,提出一种钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑(SLBRB),在多遇和罕遇地震作用下提供侧向刚度和消耗地震能量。在多遇地震作用下SLBRB中的铅芯剪切屈服消耗地震能量,在罕遇地震作用下SLBRB中的核心板屈服,进一步消耗地震能量并减少地震影响,实现了分级耗能。

1 SLBRB的组成、构造及特点

钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑(SLBRB)由一字型核心板、铅芯、外约束板、垫板等4部分组成,其整体与拆解如图1所示。核心板通过拉压滞回耗能,铅芯通过剪切滞回耗能,两者并联,利用屈服位移不同实现分级耗能作用。为防止铅芯开孔处周围的核心板形成薄弱段,导致应力集中,进而影响核心板的耗能效果,在核心板上进行开孔削弱其强

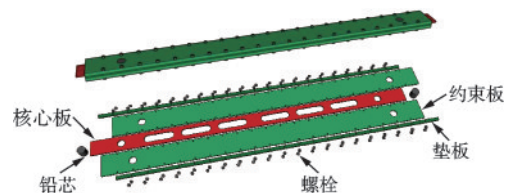


图1 SLBRB整体与拆解示意

Fig.1 Overall and disassembled view of SLBRB

度。核心板、外约束板与垫板由高强螺栓装配为一个整体,铅芯可在装配后灌注入预留孔内,核心板与外约束板之间留有一定空隙,空隙中填入润滑剂以减少构件之间的摩擦力。

与传统BRB相比,SLBRB在构造上有以下不同之处:①核心单元由一块一字型核心板和两端的铅芯构成;②为装配时铅芯的加入,一字型核心板两端部附近进行开孔;③对一字型核心板核心部分进行开孔,削弱其强度,防止铅芯开孔处周围的核心板形成薄弱段。

以上构造形式使SLBRB不仅具有传统BRB的基本特点外,还具有以下优点:①铅芯与核心板并联的构造形式,可以提供多遇地震作用下的耗能能力,并且铅芯的加入可以提高屈曲约束支撑的承载力;②核心板通过开孔形成了屈服段和非屈服段,从而实现了核心板定点屈服以及多点屈服^[7]。③SLBRB装配式的组成,可以使其在地震作用后根据核心钢板和铅芯的受损情况进行更换,进而可以实现二次使用。

2 工作原理及力学模型

2.1 工作原理

钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑(SLBRB)利用铅芯与核心板的材料性能及耗能机理不同,在多遇和罕遇地震作用下实现分级耗能。铅芯通过剪切变形耗能,核心板通过轴向拉压变形耗能;其中,铅芯的屈服位移远小于核心板的屈服位移,使得SLBRB能够在微小位移下就能够耗能。铅芯两端与约束板连接,中间段与核心板连接,在SLBRB的整个工作过程中外约束板不发生位移,核心板受力发生轴向拉压变形,带动两端铅芯发生剪切变形,进而使其屈服耗能。

在多遇地震作用下,SLBRB中的铅芯达到屈服位移,进入塑性耗能阶段消耗地震能量,而核心板

件仍处于弹性阶段;在罕遇地震作用下 SLBRB 中的铅芯首先达到屈服位移,随着地震作用增大,核心板也达到屈服位移,铅芯与核心板一起协同工作,共同耗能。

2.2 力学模型

进行基于 SLBRB 结构的抗震分析需要动态非线性分析。在这些分析中,需要 SLBRB 的力学模型。因此,有必要提出一种 SLBRB 的力学模型来模拟其滞回性能。力学模型应尽可能简单并具有合理的精度,并且还应与 SLBRB 的设计原理相一致。以下介绍 SLBRB 的理论力学模型。

根据第一节中所述的 SLBRB 的构造,铅芯与 SLBRB 的核心板并联连接,以协同工作。除了铅芯和核心板,其他部分始终保持弹性。根据铅芯和核心板的受力状态,SLBRB 的工作状态可分为三个阶段:(I)铅芯和核心板都保持弹性;(II)铅芯屈服进入塑性,核心板保持弹性;(III)铅芯和核心板皆屈服进入塑性。SLBRB 的理论力学模型如图 2 所示。

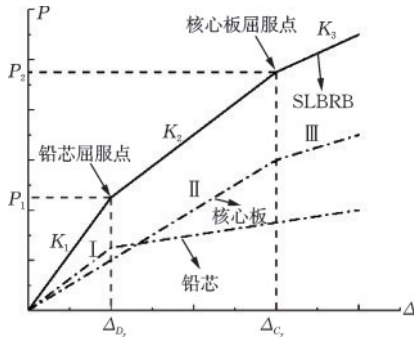


图2 SLBRB 的理论力学模型

Fig.2 Theoretical mechanical model of SLBRB

根据平衡方程,得出了上述三个阶段 SLBRB 的载荷—位移关系和刚度公式,如下所示:

$$\text{阶段 I}(\Delta \leq \left(1 + \frac{k_D}{k_T}\right) \Delta_{D_y}):$$

$$P_1 = \left(\frac{1}{\frac{1}{k_D} + \frac{1}{k_T}} + k_C \right) \Delta \quad (1)$$

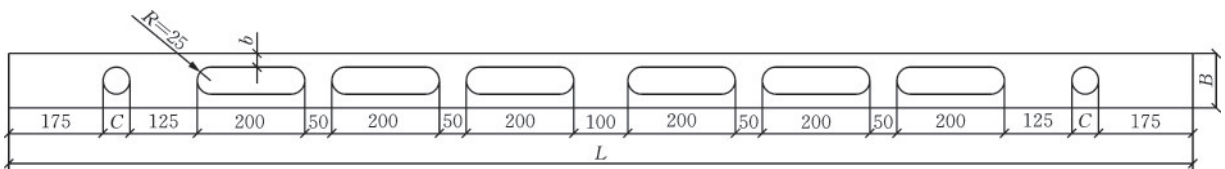


图3 各试件核心板尺寸示意

Fig.3 Schematic diagram of core plate dimensions of each specimen

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{k_D} + \frac{1}{k_T}} + k_C \quad (2)$$

阶段 II($(1 + \frac{k_D}{k_T}) \Delta_{D_y} \leq \Delta \leq \Delta_{C_y}$):

$$P_2 = \left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_D k_D} + \frac{1}{k_T}} + k_C \right) \Delta + \frac{\frac{1}{\alpha_D} - 1}{\frac{1}{\alpha_D k_D} + \frac{1}{k_T}} \Delta_{D_y} \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_D k_D} + \frac{1}{k_T}} + k_C \quad (4)$$

阶段 III($\Delta \geq \Delta_{C_y}$):

$$P_3 = \left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_D k_D} + \frac{1}{k_T}} + \alpha_C k_C \right) \Delta + \frac{\frac{1}{\alpha_D} - 1}{\frac{1}{\alpha_D k_D} + \frac{1}{k_T}} \Delta_{D_y} + (1 - \alpha_C) k_C \Delta_{C_y} \quad (5)$$

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_D k_D} + \frac{1}{k_T}} + \alpha_C k_C \quad (6)$$

式中, Δ_{D_y} 和 Δ_{C_y} 分别是铅芯与核心板的屈服位移; k_D 是铅芯的初始刚度; k_C 是核心板的初始刚度; k_T 是外约束板的初始刚度; α_D 和 α_C 分别是铅芯和核心板的屈服后刚度的折减系数。

3 试件设计

为研究 SLBRB 构造设计的合理性,比较其与传统 BRB 的力学性能差异,在有无铅芯以及核心板是否开孔等条件下设计了三组试件。各试件的主要尺寸和设计参数见图 3 和表 1。其中试件 SLBRB-1 为本文提出的钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑;试件 BRB-1 与 SLBRB-1 相比未加入铅芯;试件 BRB-2 与 SLBRB-1 相比核心板未开孔。核心板开孔参数在文献[7]中的建议范围内取值:面积比 $R_1=0.5$ 、长宽比 $R_2=8$ 以及间距比 $R_3=1$ 。

由于在分析中不考虑屈曲约束支撑与节点板相连部分以及螺栓作用,所以此处 SLBRB 核心板

表1 各试件的主要尺寸和设计参数

Table 1 Main dimensions and design parameters of each specimen

试件	核心板 $L_c \times B_c \times T_c$ (长×宽×厚)/mm	外约束板 $L_r \times B_r \times T_r$ (长×宽×厚)/mm	垫板 $L_s \times B_s \times T_s$ (长×宽×厚)/mm	铅芯直径 C/mm	核心板 是否开孔	核心受力区 宽度 B/mm
SLBRB-1	2 200×100×10	2 100×143×15	2 100×20×13	50	是	50
BRB-1	2 200×100×10	2 100×143×15	2 100×20×13	0	是	50
BRB-2	2 200×100×10	2 100×143×15	2 100×20×13	50	否	100

总长不包含节点板连接区的长度,且不考虑高强螺栓的设计。

4 有限元模型的建立与验证

4.1 单元选择及网格划分

采用ABAQUS有限元分析软件建立各试件的有限元模型,模型主要分成铅芯、核心板、外约束板及垫板4个部件。所有部件均采用三维八节点减缩积分实体单元C3D8R建立。铅芯网格大小为7.6 mm,核心板、外约束板及垫板整体网格大小为12 mm。为保证计算精度,在SLBRB核心板开孔处采用6 mm的网格进行加密。试件SLBRB的网格划分如图4所示。

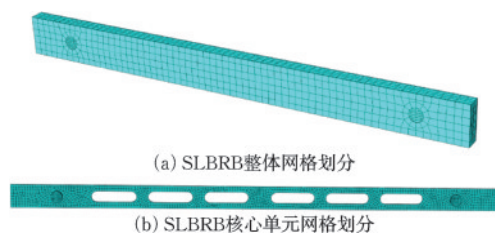


图4 试件SLBRB网格划分

Fig.4 Mesh division of SLBRB specimens

4.2 材料本构

外约束板和垫块采用Q345钢材的理想弹塑性模型,不考虑钢材的塑性属性;核心钢板采用Q235钢材,采用双线性随动强化模型模拟其本构,弹性模量采用 $E_s = 2.06 \times 10^5$ MPa,屈服后切线模量采用 $E_s' = 0.02 E_s$,泊松比采用 $\nu_s = 0.3$;铅属于理想弹塑性体,铅芯的力学模型可简化为铅的理想弹塑性模型,采用等向强化模型模拟其本构,弹性模量采用 $E_l = 16 460$ MPa,屈服应力采用10.5 MPa,切线模量采用 $E_l' = 0$ MPa,泊松比采用 $\nu_l = 0.42$ 。

4.3 接触定义

SLBRB核心板与外约束板之间的法向接触采

用“硬”接触,允许接触后分离,切向接触采用库伦摩擦模型,摩擦系数取0.1,采用有限滑移公式。因不考虑垫板及螺栓的受力,因此垫板与外约束板、铅芯与核心板、外约束板之间均采用Tie接触。

4.4 边界条件及加载制度

通过对SLBRB核心板两端施加位移带动铅芯对SLBRB实施循环加载。首先对核心板进行屈曲模态分析,对核心板施加1/1 000试件总长的一阶屈曲模态作为初始缺陷。加载制度采用位移控制加载方式,两端固接循环往复加载,位移加载幅值分别为 $L/880, L/300, L/200, L/150$ 和 $L/100$,其中 $L/880$ 是铅芯屈服但核心板未屈服的位移幅值, L 为核心板总长度(2 200 mm)。

4.5 模型验证

本文SLBRB建模方法的合理性已与文献[8]对比验证,对比结果如图5所示,证明使用此方法建立各SLBRB模型合理,分析结果可靠。

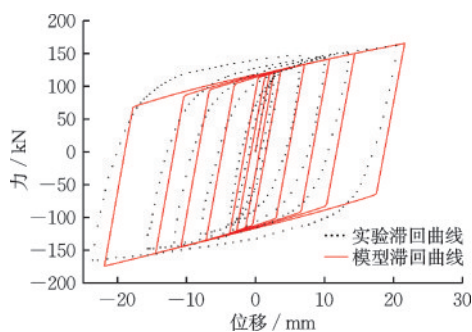


图5 模拟与实验结果对比

Fig.5 Comparison between simulation and experimental results

5 有限元结果分析

5.1 滞回曲线

SLBRB的滞回曲线如图6所示。从开始加载到加载至最大位移,其滞回曲线整体饱满、稳定,呈

标准纺锥形,刚度与承载力均无明显退化,表明 SLBRB 具有良好的滞回性能和耗能能力以及稳定的承载力,核心板与铅芯能很好的协同工作,共同耗能。当 SLBRB 以 $L/880$ 为幅值加载时,铅芯受剪屈服耗能,核心板仍处于弹性阶段,滞回曲线饱满,表明铅芯单独耗能能力稳定,能够实现多遇地震下的耗能减震作用。当 SLBRB 以大于 $L/880$ 的位移幅值加载时,核心板与铅芯共同耗能,滞回曲线仍饱满稳定,表明核心板没有因与铅芯组合而降低自身的工作性能。

从图 6 中可以看出:BRB-1 与 SLBRB-1 对比,由于未配置铅芯承载力小于 SLBRB-1,且在位移加载小于 $L/880$ 时,核心板仍处于弹性状态,不产生耗能作用;而位移加载大于 $L/880$ 时,核心板进入塑性状态,才能产生耗能作用;而 SLBRB-1 由于配置铅芯,铅芯在微小位移状态下就进入了塑性状态,产生耗能作用,当位移逐渐增大至核心板屈服,与铅芯共同耗能。从图 7 中可以看出:BRB-2 与 SL-

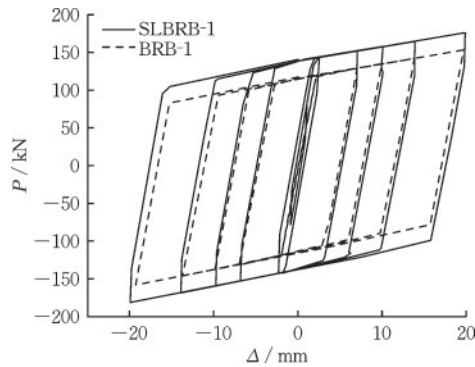


图 6 滞回曲线
Fig.6 Hysteresis curves

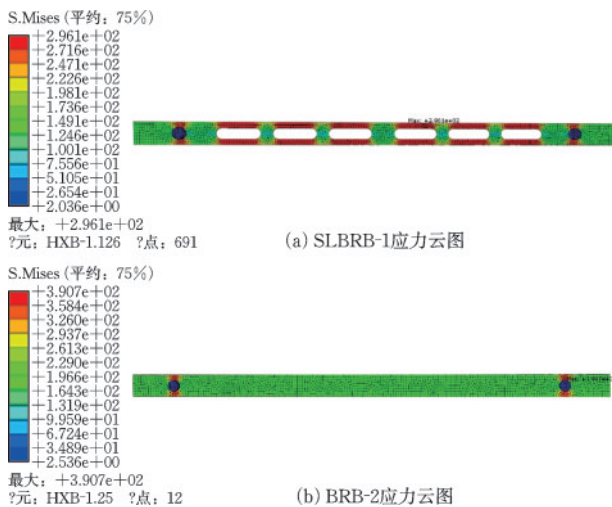


图 7 不同形式的 SLBRB 应力云图

Fig.7 Stress contour maps of SLBRB in different configurations

BRB-1 相比,由于核心板未开孔,核心板在铅芯开孔处周围产生应力集中,导致其无法正常工作,因此 SLBRB 在设计时核心板需开孔。

5.2 骨架曲线

从图 8 可以看出:SLBRB 的骨架曲线具有明显的双屈服点,可以近似为三折线,第一个转折点对应于铅芯在微小位移下的屈服耗能,使 SLBRB 在多遇地震作用下拥有耗能能力;第二个转折点对应于核心板屈服耗能,保证 SLBRB 在罕遇地震下拥有稳定高效的耗能能力。SLBRB 的工作过程整体可以分为下面三个阶段:

- (1) 整体弹性阶段。该阶段内 SLBRB 整体处于弹性工作阶段。
- (2) 弹塑性阶段。该阶段内 SLBRB 处于弹塑性耗能状态,铅芯屈服耗能,屈服力较小,在微小的位移下开始屈服耗能,核心板仍保持弹性。
- (3) 整体塑性阶段。该阶段内 SLBRB 内核部分全部进入塑性耗能工作状态。

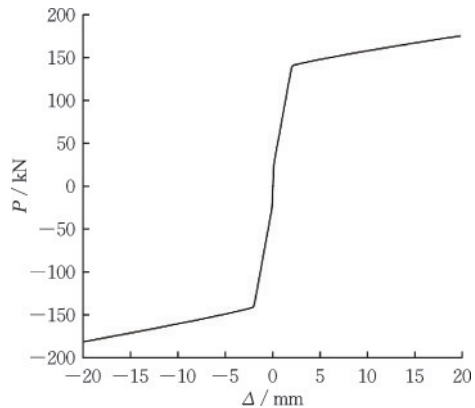


图 8 SLBRB 骨架曲线
Fig.8 Skeleton curve of SLBRB

5.3 拉压不均匀系数

由于泊松效应,核心板受压时截面压缩膨胀,以及核心板发生多波屈曲时与外约束板接触产生摩擦力,导致同级位移加载时滞回曲线的压力峰值略大于拉力峰值,呈现出一定的拉压不对称现象,通过拉压不均匀系数 β 来反应。拉压不均匀系数定义为在设计位移下轴向受压承载力与轴向受拉承载力的比值。SLBRB 在 $L/100$ 加载幅值时的拉压不均匀系数 β 为 1.06,表明其具有较对称的拉压滞回性能,且满足美国规范 ANSI/AISC341-10^[9],对拉压不均匀系数 $\beta \leq 1.3$ 的规定。

5.4 等效黏滞阻尼比

SLBRB 在各个工况下的耗能能力可采用等效粘滞阻尼比 ξ 来合理评估,其值可按以下公式进行计算:

$$\xi = \frac{A_{loop}}{2\pi F_{max} \Delta_{max}} \quad (7)$$

式中, A_{loop} 为当前滞回曲线面积; F_{max} 为最大力; Δ_{max} 为当前最大位移。

SLBRB 在 $L/880 \sim L/100$ 加载幅值下的等效阻尼比数值见表 2。由表可知,在 $L/880$ 加载幅值时, ξ 值较小,核心板处于弹性, ξ 反映铅芯单独耗能时的情况;在 $L/880$ 加载幅值之后,核心板屈服, ξ 值显著增大, ξ 反映核心板与铅芯共同耗能的情况;在 $L/200$ 加载幅值时, ξ 达到最大值 0.511,随后 ξ 值略微有所下降并趋于平缓,表明核心板与铅芯能够协同工作,且二者的组合能够发挥更好的耗能效果。

表 2 等效粘滞阻尼比

Table 2 Equivalent viscous damping ratio

加载位移	L/880	L/300	L/200	L/150	L/100
ξ	0.317	0.494	0.511	0.497	0.496

5.5 延性系数及累积塑性变形

试件的塑性变形能力可通过延性系数 μ_{max} 和累积塑性变形的参数 D_{cp} 来评价, D_{cp} 反映了 SLBRB 在低周往复加载中所累积的总塑性变形与屈服位

移的比值,各表达式为:

$$\mu_{max} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (8)$$

$$D_{cp} = \sum \left[\frac{2(|\Delta_{cmax}|_i + |\Delta_{tmax}|_i)}{\Delta_y} - 4 \right] \quad (9)$$

式中, μ_{max} 为延性系数; D_{cp} 为累积塑性变形; Δ_{max} 为最大加载位移; Δ_y 为屈服位移,因 SLBRB 有两个屈服位移, Δ_y 取第一屈服位移 0.125 mm; Δ_{cmax} 与 Δ_{tmax} 分别为 SLBRB 未破坏前极限受压与受拉变形。


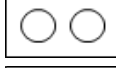
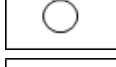
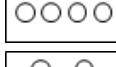
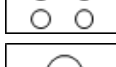
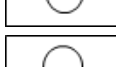
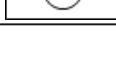
SLBRB 的延性系数 μ_{max} 为 160,表明其具有较大的延性,耗能能力较好,累积塑性变形 D_{cp} 为 1 680,塑形变形能力较优,满足美国规范 ANSI/AISC341-10^[9] 中对防屈曲支撑的累积塑性变形大于 200 倍屈服位移的最小值规定。

6 影响 SLBRB 性能的参数

影响钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑 (SLBRB) 的关键参数主要有铅芯截面积、铅芯的布置方式以及铅芯的直径与核心板开孔宽度的比值,以下简称径宽比 ($C/(B-2b)$)。通过控制变量法,改变以上参数,设计了 7 组钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑,以研究不同关键参数对 SLBRB 滞回耗能性能的影响,各试件的具体参数见表 3。其中,铅芯截面积的变化采用控制径宽比小于等于 1 的原则进行设计,金属铅芯布置方式的变化采用等面积原则进行设计。核心钢板开孔参数在文献[7]中的建议范

表 3 各试件尺寸及关键参数

Table 3 Dimensions and key parameters of each specimen

试件	核心板 $L_c \times B_c \times T_c$ (长 \times 宽 \times 厚)/mm	铅芯直径 C /mm	铅芯面积 S /mm ²	铅芯布置方式	径宽比 $C/(B-2b)$
SLBRB-1	2 200 \times 100 \times 10	50	1 963		1
SLBRB-2	2 200 \times 100 \times 10	2 \times 50	3 927		1
SLBRB-3	2 200 \times 100 \times 10	40	1 257		0.8
SLBRB-4	2 200 \times 100 \times 10	4 \times 25	1 963		0.5
SLBRB-5	2 200 \times 100 \times 10	4 \times 25	1 963		1
SLBRB-6	2 200 \times 100 \times 10	60	2 827		1.2
SLBRB-7	2 200 \times 100 \times 10	70	3 848		1.4

围内取值:面积比 $R_1=0.5$ 、长宽比 $R_2=8$ 以及间距比 $R_3=1$ 。

6.1 铅芯截面积

采用控制径宽比小于等于 1 的原则设计了 $1\ 257\ \text{mm}^2$ (SLBRB-3)、 $1\ 963\ \text{mm}^2$ (SLBRB-1)、 $3\ 927\ \text{mm}^2$ (SLBRB-2) 3 种不同铅芯截面积的有限元模型,试件其他设计参数相同。将 3 个模型的滞回曲线结果进行对比,如图 9 所示。对 3 个不同铅芯截面积的 SLBRB 各力学性能进行对比分析,见表 4。

由图 9 及表 4 可知:3 个 SLBRB 模型的滞回曲线饱满,体现出良好的滞回耗能性能;铅芯截面积对 SLBRB 的影响主要体现在两级屈服荷载以及最大阻尼力的提升上;随着铅芯截面积的增大,两级屈服荷载以及最大阻尼力有较大的提升,等效阻尼比有所增加,屈服位移基本相同;故较大的铅芯截

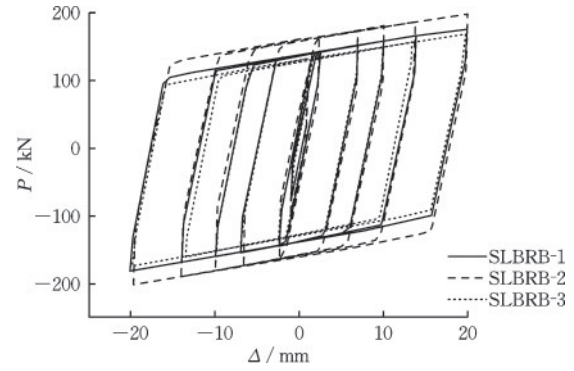


图 9 不同铅芯截面积的滞回曲线

Fig.9 Hysteresis curves of different lead core cross-sectional areas

面积有利于 SLBRB 的滞回耗能性能。但同时发现随着铅芯截面积的增加,SLBRB 核心单元的最大应力由核心板的核心段转移至核心板铅芯开孔处,这将导致 SLBRB 核心板两端先于核心段破坏,使 SLBRB 无法正常工作。

表 4 不同铅芯截面积的 SLBRB 性能参数对比

Table 4 Comparison of SLBRB performance parameters with different lead core cross-sectional areas

试件	P_{y1}/kN	P_{y2}/kN	Δ_{y1}/mm	Δ_{y2}/mm	P_0/kN	σ_c/MPa	σ_d/MPa	ξ
SLBRB-1	26.3	140.6	0.125	2.103	180.9	314.4	303.6	0.496
SLBRB-2	43.3	161.3	0.128	2.200	200.9	308.7	316.7	0.512
SLBRB-3	18.5	132.3	0.120	2.143	173.6	297.6	239.2	0.461

注: P_{y1} 为第一屈服荷载; P_{y2} 为第二屈服荷载; Δ_{y1} 为第一屈服位移; Δ_{y2} 为第二屈服位移; P_0 为最大阻尼力; σ_c 为核心板核心段最大应力; σ_d 为核心板铅芯开孔处最大应力; ξ 为等效黏滞阻尼比

为找出铅芯截面积的合理取值范围,在 SLBRB-1 和 SLBRB-2 的铅芯截面积取值之间进行等间隔插值分析,将加入的铅芯截面积换算成标准屈服力与核心板核心段的标准屈服力比值作为横坐标,核心板核心段最大应力与核心板铅芯开孔处最大应力的比值作为纵坐标,得出如图 10 的关系曲线。

由图 10 可知:当 F_d/F_c 小于 0.229 时, σ_d/σ_c 的值小于 1,保证了 SLBRB 核心板两端不先于核心段破坏;所以为使得 SLBRB 发挥良好的滞回耗能性能,铅芯截面积的取值应保证 F_d/F_c 小于等于 0.229。

6.2 铅芯布置形式

以铅芯截面积相等为原则,将 SLBRB 的铅芯布置为 1 个铅芯 (SLBRB-1)、4 个铅芯一字形排列 (SLBRB-4)、4 个铅芯方形排列 (SLBRB-5) 3 种形式,其余设计参数均相同,研究不同铅芯布置形式

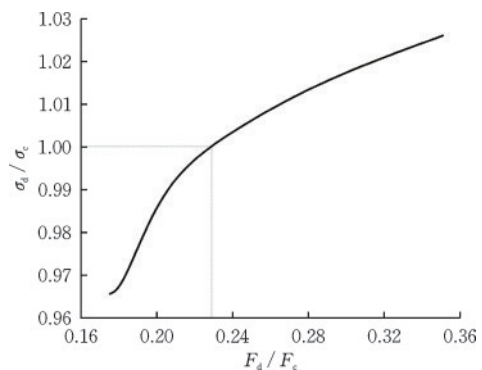


图 10 F_d/F_c 与 σ_d/σ_c 关系图

Fig.10 Relationship between F_d/F_c and σ_d/σ_c

注: F_d 为铅芯标准屈服力; F_c 为核心板核心段的标准屈服力; σ_d 为核心板铅芯开孔处最大应力; σ_c 为核心板核心段最大应力

对 SLBRB 性能的影响。不同铅芯布置形式的 SLBRB 滞回曲线如图 11 所示;对 3 种不同铅芯布置形式的 SLBRB 各力学性能进行对比分析,结果见表 5。

由图 11 及表 5 可知:铅芯的布置形式对 SLBRB

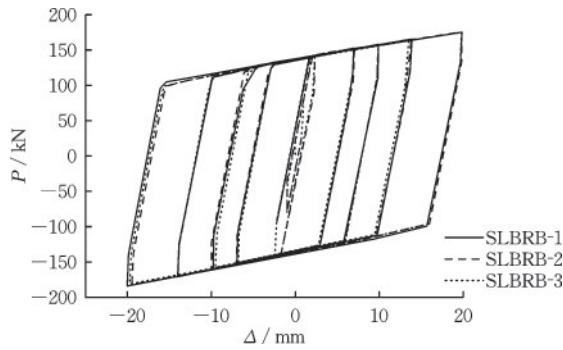


图 11 不同铅芯布置形式的滞回曲线

Fig.11 Hysteresis curves of different lead core arrangements

表 5 不同铅芯布置形式的 SLBRB 性能参数对比

Table 5 Comparison of SLBRB performance parameters with different lead core arrangements

试件	P_{y1}/kN	P_{y2}/kN	Δ_{y1}/mm	Δ_{y2}/mm	P_0/kN	σ_c/MPa	σ_d/MPa	ξ
SLBRB-1	26.3	140.6	0.125	2.103	180.9	314.4	303.6	0.496
SLBRB-4	24.7	139.0	0.113	2.075	181.1	315.7	236.7	0.471
SLBRB-5	24.5	139.2	0.114	2.154	180.8	315.1	274.3	0.469

6.3 铅芯直径与核心板开孔宽度比

设计了 4 种不同径宽比的 SLBRB 模型,径宽比分别为 0.8 (SLBRB-3)、1.0 (SLBRB-1)、1.2 (SLBRB-6)、1.4 (SLBRB-7),其余设计参数均相同。研究不同径宽比对 SLBRB 力学性能的影响。不同径宽比的 SLBRB 滞回曲线如图 12 所示;对 4 种不同径宽比的 SLBRB 各力学性能进行对比分析,结果见表 6。

从图 12 及表 6 可知,当径宽比小于等于 1.0 时,滞回曲线整体饱满、稳定,体现出良好的滞回耗能能力和稳定的力学性能;当径宽比大于 1.0 时滞回曲线开始出现向内的捏缩,当径宽比为 1.4 时滞回曲线出现了明显的捏缩现象,从表 6 中可以看出这是由于核心板铅芯开孔出外出现较大的应力集中,使构件的变形主要集中于此处,核心板核心段无法正常发挥耗能作用所致。随着径宽比的增大第一屈服荷载随之增大;第二屈服荷载及最大阻尼力先

的滞回曲线影响较小,3 种布置形式的 SLBRB 的滞回曲线基本重合。对比结果数据可以看出,铅芯的布置形式对核心板铅芯开孔处最大应力 σ_d 影响较大,其中 SLBRB-4、SLBRB-5 的 σ_d 比 SLBRB-1 分别降低了 22%、9.7%;采用单根铅芯布置的 SLBRB 的等效黏滞阻尼比较其他两种布置形式的 SLBRB 大;铅芯的布置形式其余性能参数影响较小。故综合考虑构件加工及滞回耗能效果,宜采用单根铅芯布置形式更有利于 SLBRB 的充分屈服耗能,等效黏滞阻尼比更大,耗能效果更好。

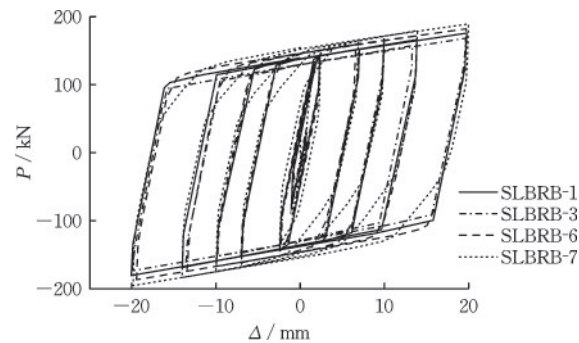


图 12 不同径宽比的滞回曲线

Fig.12 Hysteresis curves of different diameter-to-width ratios

增大后趋于平缓,这是由于核心板应力集中于铅芯开孔处;第一屈服位移及第二屈服位移先不变后增大,这是由于核心板应力集中于铅芯开孔处,核心板核心段延缓进入屈服状态,导致两极屈服位移增大;核心板核心段应力逐渐小于核心板铅芯开孔处;等效黏滞阻尼比先增大后减小。因此为保证 SLBRB 能够充分发挥滞回耗能性能,铅芯的径宽比取值应小于等于 1。

表 6 不同径宽比的 SLBRB 性能参数对比

Table 6 Comparison of SLBRB performance parameters with different diameter-to-width ratios

试件	P_{y1}/kN	P_{y2}/kN	Δ_{y1}/mm	Δ_{y2}/mm	P_0/kN	σ_c/MPa	σ_d/MPa	ξ
SLBRB-1	26.3	140.6	0.125	2.103	180.9	314.4	303.6	0.496
SLBRB-3	18.5	132.3	0.120	2.143	173.6	297.6	239.2	0.461
SLBRB-6	33.8	150.8	0.146	3.261	187.4	307.9	358.7	0.487
SLBRB-7	46.7	151.8	0.194	3.910	190.1	298.7	472.0	0.467

7 结 论

提出一种新型钢铅复合分级耗能屈曲约束支撑(SLBRB),介绍了其构造与原理,采用ABAQUS有限元软件对其进行了有限元分析,最后研究了关键参数对SLBRB力学性能的影响,并给出SLBRB各关键参数的建议值,得出以下结论:

(1) 将一字型屈曲约束支撑核心板开孔与铅芯并联组成SLBRB,通过合理的设计实现分级屈服耗能。

(2) SLBRB中铅芯与核心板能很好的协同工作,滞回曲线对称,分级耗能特征明显,延性及等效黏滞阻尼比较大,效能能力优良。

(3) 通过有限元分析得出,SLBRB的铅芯截面积取值应保证 F_d/F_c 小于0.229。

(4) 综合考虑构件加工及滞回耗能效果,应采用单根铅芯布置形式更有利于SLBRB的充分屈服耗能,等效黏滞阻尼比更大,耗能效果更好。

(5) 随着径宽比的增大SLBRB的耗能性能和稳定性能先上升后下降,为保证SLBRB能够稳定发挥滞回耗能性能,SLBRB的径宽比取值应小于等于1。

参考文献:

[1] Wakabayashi M, Nakamura T, Kashibara A, et al. Experimental study of elasto-plastic properties of precast concrete wall panels with built-in insulating braces[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. [S.l.: s.n.], 1973.

[2] Kimura K, Yoshioka K, Takeda T, et al. Takemoto K., Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes[C]// Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. [S.l.]: Architectural Institute of Japan, 1976.

[3] Mochizuki N, Murata Y, Andou N, et al. An experimental study on buckling of unbonded braces under centrally applied loads[C]//Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan. [S.l.]: Architectural Institute of Japan, 1980.

[4] Watanabe A, Hitomi Y, Saeki E, et al. Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube[C]//Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo, Japan: International Association for Earthquake Engineering, 1988. 719-724.

[5] Qu B, Liu X, Hou H, et al. Testing of buckling-restrained braces with replaceable steel angle fuses[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(3): 04018001.

[6] 周云,周福霖,邓雪松.铅阻尼器的研究与应用[J].世界地震工程,1999(1):53-61.

Zhou Y, Zhou F L, Deng X S. Experimental study on properties of lead-viscoelastic dampers[J]. World Earthquake Engineering, 1999(1):53-61. (in Chinese)

[7] 田时雨,邓雪松,周云,等.开孔双核心钢板装配式屈曲约束支撑性能分析研究[J].建筑科学,2019,35(7): 8-13.

Tian S Y, Deng X S, Zhou Y, et al. Analysis study on perforated double-core steel plate assembled buckling-restrained brace[J]. Building Science, 2019, 35(7): 8-13. (in Chinese)

[8] 龚晨.开孔钢板装配式BRB设计方法及双向地震作用下结构中BRB平面外稳定性研究[D].广州:广州大学,2018

Gong C. Design method of perforated steel plate assembled BRB and study on the out of plane stability of BRB in structures under bidirectional earthquake[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)

[9] Seismic provisions for structural steel buildings: ANSI/AISC341-05[S].Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2010.

(本文编辑:赵霞)