

短屈服段屈曲约束支撑的滞回性能研究

高晨啸¹, 陈向荣^{1,2}, 王欣淼¹, 李 刚³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 设计研究总院, 陕西 西安 710055)

摘要: 提出短屈服段屈曲约束支撑(SC-BRB), 以解决在罕遇地震下钢框架结构残余层间位移角过大导致震后支撑更换困难问题。采用有限元对 SC-BRB 的滞回性能进行研究, 分析参数对支撑的影响规律。结果表明: 屈服段长度对 BRB 的滞回性能影响较大, 集中因子 α 减小后, SC-BRB 能较早地进入耗能阶段, 拥有更高的耗能效率, 但 SC-BRB 的低周疲劳性能较差; SC-BRB 具有足够的耗能能力; 增加内核板的宽厚比可减小外约束的用钢量, 但宽厚比的增加, 会导致支撑低周疲劳性能和延性降低, 建议内核宽厚比限值取 15; 外约束所需的最短长度随着集中因子 α 的增大而增大, 建议取屈服段长度和 0.5 倍支撑总长中的较大值; 建议 SC-BRB 选取摩擦系数不大于 0.1 的无粘结材料。

关键词: 短屈服段屈曲约束支撑; 滞回性能; 宽厚比; 外约束长度; 有限元方法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)06-0819-08

Analysis of hysteresis behavior of short-yielding-section buckling-restrained brace

GAO Chenxiao¹, CHEN Xiangrong^{1,2}, WANG Xinmiao¹, LI Gang³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Design & Research Institute, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The paper, the short-yielding-section buckling-restrained brace (SC-BRB) is proposed to solve the difficulty of brace replacement due to excessive deformation and large residual inter-layer drift of steel frames under extreme seismic loading. Finite element method is applied to study the hysteresis behavior of buckling-restrained braces with different yielding section lengths. The influence of key parameters on the brace is analyzed. The results demonstrate that the yielding section length has a great influence on the hysteresis performance of BRB. After decrease of the concentration factor α , BRB can enter the plastic energy consumption stage earlier, at the same time can have higher energy consumption efficiency, but SC-BRB has poor low-cycle fatigue performance; SC-BRB has sufficient energy consumption capacity. The amount of steel used for external restraint can be reduced with the larger ratio of width to thickness in the core plate. However, low cycle fatigue performance and ductility of the core can be ineffective if the ratio of width to thickness is extreme. It is suggested that the ratio of width to thickness is no more than 15. It is also recommended that the shortest external restraint length is 1/2 of the total brace length to avoid the large stress intensity in the brace. Finally, since the friction has a significant effect on the performance of SC-BRB. Unbounded materials with friction coefficient less than 0.1 may be selected between the BRB core plate and the outer restraint.

Key words: SC-BRB; hysteresis performance; ratio of width to thickness; external constraint length; finite element method

屈曲约束支撑(BRB)是一种在拉力和压力下均能达到全截面屈服的构件, 具有稳定的滞回性能

和良好的耗能能力^[1], 用于钢框架结构不仅增加了框架的抗侧刚度^[2], 还能保证在地震作用时支撑不

收稿日期: 2022-07-02

修回日期: 2022-09-08

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2022JM-268)

第一作者: 高晨啸(1999—), 男, 硕士生, 主要从事结构工程, 钢结构方面的研究。E-mail: 1192320437@qq.com

通信作者: 陈向荣(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事结构工程方面的研究。E-mail: cxr90@126.com

会发生受压屈曲,在抗震区得到广泛应用.然而已有研究及震害表明,在遭遇罕遇地震时,屈曲约束支撑钢框架会产生变形过大和支撑更换困难的问题^[3-7].本文提出短屈服段屈曲约束支撑(SC-BRB),在遭遇罕遇地震时短屈服段虽然塑性应变较大,但因为较小的轴向变形和较长的连接段长度使结构具有更强的整体刚度,因此可以大幅减少结构的层间位移,使其具有更好的更换性能.本文使用有限元软件 Abaqus 进行建模与数值模拟,分析 SC-BRB 的滞回性能、骨架曲线和耗能能力,并探讨影响其性能的影响因子.

国内外学者对屈曲约束支撑的受力性能进行了大量研究, Karimi 等^[8]对 BRB 支撑进行了抗震性能研究,分析了影响因素;王永贵等^[9]设计 7 种不同连接方式的屈曲约束支撑,通过拟静力加载试验研究了不同参数对屈曲约束支撑滞回性能的影响;张俊贤等^[10]针对有无粘结层对全钢屈曲约束支撑破坏形式、滞回性能、等效粘滞阻尼比等开展研究; Pettinga 等^[11]对以新西兰规范设计的 4 层屈曲约束支撑框架进行的非线性时程分析,发现设计水准地震下,平均层间残余变形可达到 0.85%~0.89%; Fehnestock 等^[12]对依照 AISC 等规范设计的 4 层和 10 层屈曲约束支撑框架进行了非线性时程分析,结果表明,在设计地震及罕遇地震水准下,结构的最大层间残余变形分别可达 0.5%及 1.2%,如此大的残余变形角意味着震后结构需要拆除重建;吴长等^[13]对开孔双钢管约束支撑的滞回性能进行研究,并用约束支撑替换原有杆件进行振动台试验,研究表明约束支撑可

以有效地减小结构的动力响应,具有良好的减震效果.

Hoveidae 等^[14]对装有短屈服段屈曲约束支撑的 4 层和 10 层结构进行数值模拟,得出在 4 层和 10 层结构中, SC-BRB 比传统 BRB 能分别减少 15%和 16%的层间位移; Pandikkadavath 等^[15]对具有不同屈服段长度的 BRB 进行试验,发现减小屈服段长可以提高支撑弹性刚度和屈服后的刚度,并且可以减小结构残余层间位移,提高结构的整体抗震性能.以上研究仅集中在短屈服段屈曲约束支撑可有效减小结构残余层间位移,并未对 SC-BRB 进行参数分析,也未提出设计建议.

本文从 SC-BRB 核心段的宽厚比、外约束长度和核心段与外约束的摩擦关系三个方面进行参数分析并提出设计建议.

1 数值分析模型的建立与验证

1.1 建立数值分析模型

本文通过使用有限元软件 Abaqus 对文献[16]的屈曲约束支撑进行数值分析,与试验结果对比,以验证数值分析结果的可靠性.试件尺寸见图 1.对 3.0 m 的 BRB 进行拉压往复加载试验,外约束板采用 SN400B, H 型双腹板钢,其名义屈服强度为 235 MPa.本构关系采用双线性模型,屈服后强化段弹性模量取初始弹性模量的 1/100.支撑的内核单元采用 SLY100 低屈服点钢材,名义屈服强度为 100 MPa,考虑包辛格效应.本构模型采用混合模型(Combine).钢材的弹性模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3.试件基本尺寸如表 1 所示.

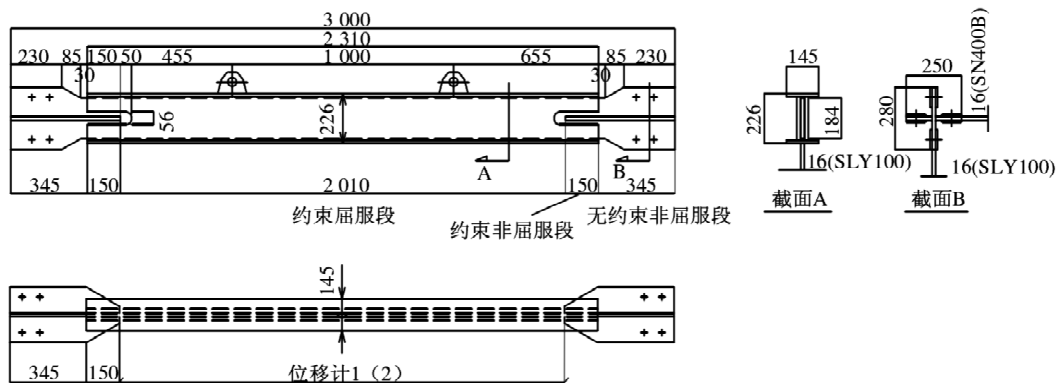


图 1 试件尺寸(mm)

Fig. 1 Size of specimens/mm

表 1 试件尺寸

Tab. 1 Size of BRB

长度 L /mm	内核截面 $t \times b$ /mm	内核屈服段长度 L /mm	外约束截面 $h_o \times b_t \times t_w \times t_f$ /mm	外约束长度 L /mm
3 000	16×184	2 010	226×145×16×16	2 310

采用实体元 C3D8R(线性减缩积分单元)进行建模,沿厚度方向划分四个单元,可以很好地平衡计算精度和计算时长问题.在内核板屈服段、过渡段对网格进行加密,对其它部分相对降低种子数量.网格划分见图 2.

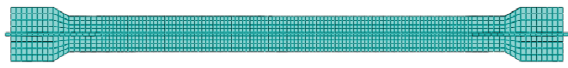


图 2 网格划分
Fig. 2 Mesh dividing

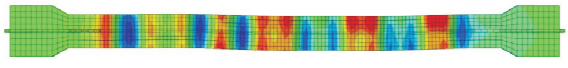
设置模型内核厚度方向间隙 2 mm,宽度方向间隙为 5 mm,此间隙意在模拟实际支撑中内核与外约束之间的无粘结材料.创建内核与外约束之间的面-面接触,内核为主面.接触属性设置为法向接触为“硬”接触,切向接触的摩擦系数为 0.1,并且设置线形阻尼多项式系数为 0.1.屈曲约束支撑对材料加工精度要求较高,所以初始缺陷是不可忽略的.内核板两端的加劲肋是通过焊接与构件连接,焊接热效应所产生的初弯曲是初始缺陷的主要影响因素.文献[17]对内核初始缺陷的形式与影响大小进行了研究.发现对于承受轴向力的支撑构件来说,一阶模态对构件的影响更为显著,因此构件初始缺陷选择为特征值屈曲分析的一阶模态.并且在模型 1/2 长度位置处,建立约束方程来限制内核板与外约束的相对位移,保证他们不会发生脱离.

1.2 模型的验证

分别对比有限元软件得出的应力云图、滞回曲线和实际构件的破坏图、滞回曲线.如图 3(a)所示,红色对应波峰;蓝色对应波谷.实际构件的破坏图如图 3(b)所示,内核段间断的颜色变浅,其原因是因为在较大的摩擦力作用下,钢材的无粘性材料被磨掉,在颜色较浅位置接触应力较大.两者对比看出:有限元模型的内核段发生较大横向位移的位置与实际构件基本一致.图 3(c)对比了实际构件的滞回曲线和有限元软件得出的滞回曲线,可以看出两者曲线基本一致,但有限元承载力略小于试验结果.其主要原因可能是接触属性中切向属性数值设置较小,可调整接触切向属性值为 0.3 来模拟橡胶的影响.



(a) 试件破坏照片



(b) 有限元加载结果应力云图

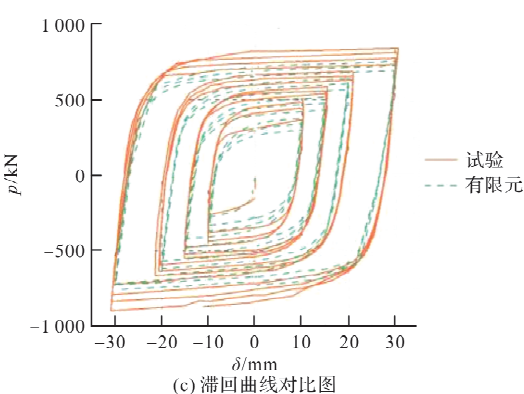


图 3 试验构件与有限元加载结果分析对比
Fig. 3 The result of compare between specimens and analysis of Abaqus

综上所述,本文采用的建立模型的方法所得出的数值分析结果与试验结果基本一致,误差在可接受范围内.因此,所采用的建模方法有较高的可信度,可以进行下一步的滞回性能研究.

2 SC-BRB 的力学性能

依据上文有限元建模方法建立具有不同集中因子($\alpha=0.2\sim0.7$)的 BRB,试件编号与集中因子的关系见表 2.定义 BRB 屈服段与总长度之比为集中因子 α .内核板采用 Q235B 钢材混合强化模型^[18],外约束则采用 Q345B 钢材理想弹性模型;弹性模量均为 206 GPa,泊松比均为 0.3.屈曲约束支撑总长 L 为 5 m,外约束长度为 4 m.屈服段长度为 αL ,过渡段总长度为 $0.144L$,连接段总长度 $(1-0.144-\alpha)L$.试件尺寸见表 3.

表 2 试件编号及长度
Tab. 2 Length of specimens

试件编号	集中因子	屈服段长度/mm	构件总长/mm
SC-BRB-1	0.2	1 000	5 000
SC-BRB-2	0.3	1 500	5 000
SC-BRB-3	0.4	2 000	5 000
L-BRB-1	0.5	2 500	5 000
L-BRB-2	0.6	3 000	5 000
L-BRB-3	0.7	3 500	5 000

表 3 试件尺寸(mm)
Tab. 3 Size of specimens/mm

构件	截面尺寸	长度
内核芯板	12×200	5 000
内核加劲肋	12×94	$(1-\alpha)\times 2\ 500$
外套筒翼缘	12×120	4 000
外套筒腹板	12×210	4 000

屈曲约束支撑加载制度根据高层民用建筑钢结构设计规程规定:按位移为 $L/300$ 、 $L/200$ 、 $L/150$ 、 $L/100$ 加载,各位移水平循环三次^[19],本文增加 $L/80$ 级位移加载,循环3次。

2.1 滞回曲线

6个不同集中因子 BRB 模型的应力-应变曲线如图4所示。其中,横坐标为 BRB 内核屈服段平均应变 ϵ ,纵坐标为 BRB 整体平均应力 σ 。规定拉

为正,压为负。按位移为 $L/300$ 、 $L/200$ 、 $L/150$ 、 $L/100$ 、 $L/80$ 分别加载,各水平循环三次。采用先拉后压的顺序进行加载,由图可知,L-BRB-1~3在加载的全过程中应变水平较小。SC-BRB-1在加载位移为 $L/100$ 级时,第三次拉伸至 $+1.17\%$ 时,承载力发生明显下降。SC-BRB-2在加载位移为 $L/80$ 级时,第三次拉伸至 $+1.69\%$ 时,同时滞回曲线发生明显下降,无法继续承载。

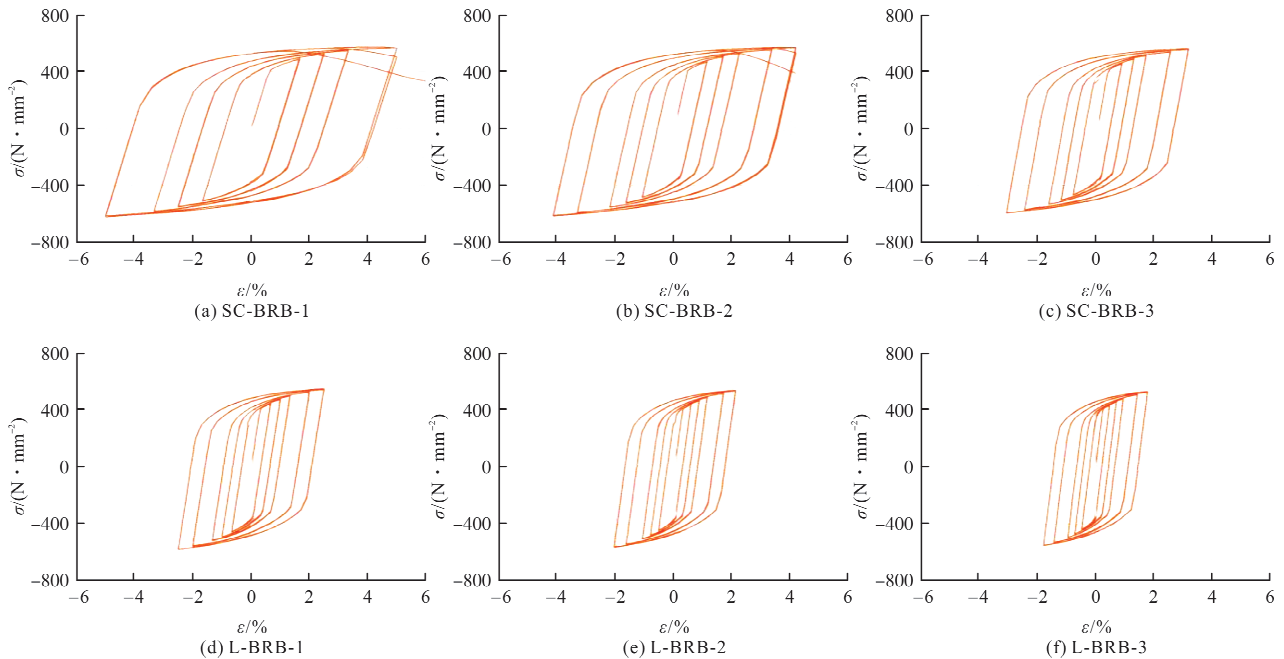


图4 不同集中因子 BRB 的应力-应变滞回曲线

Fig. 4 Stress-strain hysteresis loops of BRB with different concentration factors

由图可知,SC-BRB 有更高的应变水平,是因为在上文所提到的加载方式下,SC-BRB 可以较早地进入塑性耗能阶段,也就是拥有更高的耗能效率,即在消耗相同能量的前提下,SC-BRB 的变形量小于普通 BRB 的变形量,可以有效地减小层间位移角,使得 BRB 拥有更好的更换性能。SC-BRB 会较早地进入塑性耗能阶段,但其拥有较短的屈服段,因此导致 SC-BRB 可能会过早的失效,所以 SC-BRB 的低周疲劳性能较差。

由于进行 Abaqus 有限元模拟时未计入损伤,无法直观展现 BRB 破坏形态,因此以内核宽度方向出现明显颈缩变形视为支撑受拉破坏。如图5所示,SC-BRB-1 的内核板 Y 向变形为 32.1 mm,其内核板宽度缩小了 29%,内核板宽度方向发生了明显颈缩变形,视其为受拉破坏。SC-BRB-2 也发生了 7% 的颈缩变形,同时滞回曲线明显下降,支撑受拉破坏。

2.2 骨架曲线

骨架曲线取荷载-位移曲线的各级加载第一次

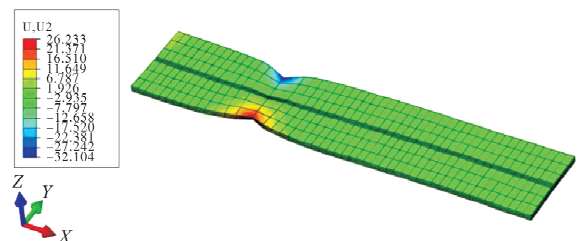


图5 SC-BRB-1 内核板变形云图

Fig. 5 Deformation of core plate of SC-BRB-1

循环的峰值点所连成的包络线。骨架曲线是每级循环加载达到水平力最大峰值的轨迹,反映了构件受力与变形的各个不同阶段及特性(强度、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等),也是确定恢复力模型中特征点的重要依据^[20]。

6个试件的骨架曲线对比如图6所示,各试件的整体变化趋势保持一致。BRB 屈服段长度与屈服位移成正比,与支撑刚度成反比。支撑屈服前后的刚度随集中因子的变化呈相同趋势,屈服段减小后,支撑弹性刚度和屈服后刚度均减小,因此,在设计短屈服段屈曲约束支撑时,应考虑加

大屈服前后刚度值.

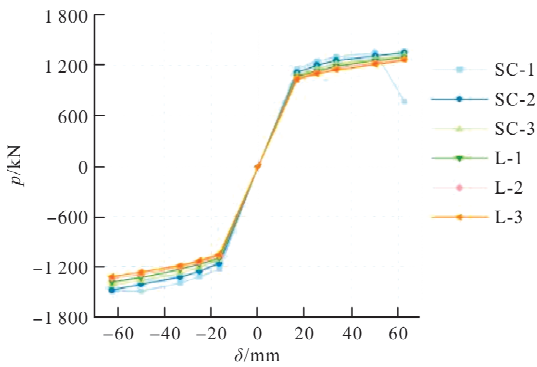


图 6 不同构件的骨架曲线

Fig. 6 The skeleton curves of different components

2.3 耗能能力

对于 BRB 来说, 其屈服段的塑性变形几乎是 BRB 耗能的全部来源, 所以随着集中因子 α 的增加, 屈服段长度增加, BRB 耗能水平也随之增加. 但是, 按目前情况来说, 普通 BRB 的耗能能力处于溢出的阶段, 在遭遇到地震时, 往往框架先被破坏. 普通 BRB 虽然有很高的耗能水平, 但很大一部分完全被浪费掉了. 所以, 在满足规范的耗能条件下, 可以适当减小集中因子 α .

3 影响 SC-BRB 性能的因素

3.1 宽厚比

宽厚比是影响 BRB 性能的重要因素, 为了防止过早的发生局部屈曲而引起的承载力下降过快. 对于全钢的约束单元, 因其性能的优越, 可以适当降低宽厚比的限值. 规定内核屈服段截面面积为 $2\,400\text{ mm}^2$, 宽厚比在 $4\sim 17$ 范围内, 对宽度与厚度进行改变, 将承载力作为标准, 探究 BRB 性能的变化. 在考虑宽厚比这一影响因素时, 把切向接触属性设置为“无摩擦”来排除摩擦这一因素的影响, 外约束长度统一设置为 $0.8L$. 试件具体截面尺寸如表 4 所示.

为了避免构件在加载时发生整体失稳破坏, 应保证一定的约束比. 本文将文献[18]中的约束比

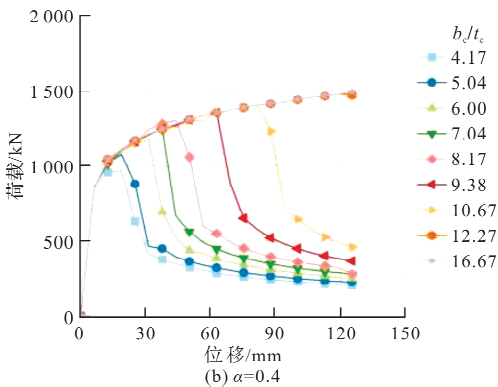
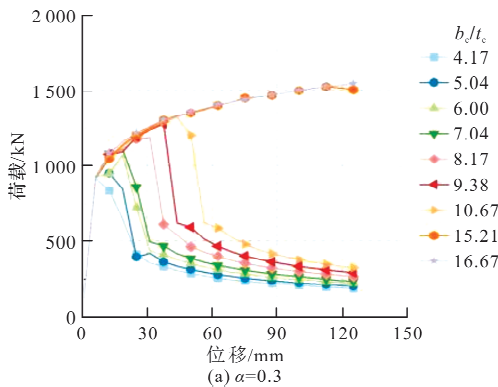
限值再扩大 1.5 倍, 来保证一定的安全冗余度, 即约束比限值为 $\xi = 1.5 \times 1.95 = 2.925$. 为研究宽厚比对构件性能的影响, 在保证内核截面面积以及内核与外约束之间的距离不变的前提下, 为了使得约束比不变的情况, 即减小外约束腹板的厚度. 不同集中因子的荷载位移曲线如图 7 所示.

表 4 试件具体截面尺寸 (mm)

Tab. 4 Section size of specimens/mm

计算模型	内核截面 $b_c \times t_c$	外约束截面 $h_w \times b_{tf} \times t_w \times t_{tf}$	内核宽厚比 b_c/t_c
K-1	100×24	$110 \times 120 \times 40 \times 30$	4.17
K-2	110×22	$120 \times 120 \times 36 \times 30$	5.04
K-3	120×20	$130 \times 120 \times 32 \times 30$	6.00
K-4	130×19	$140 \times 120 \times 28 \times 30$	7.04
K-5	140×17	$150 \times 120 \times 24 \times 30$	8.17
K-6	150×16	$160 \times 120 \times 21 \times 30$	9.38
K-7	160×15	$170 \times 120 \times 18 \times 30$	10.67
K-8	172×14	$182 \times 120 \times 16 \times 30$	12.38
K-9	191×13	$201 \times 120 \times 14 \times 30$	15.21
K-10	200×12	$210 \times 120 \times 12 \times 30$	16.67

如图 7 所示, 在 $\alpha = 0.3$ 的情况下, 当 $b_c/t_c < 15.21$ 时, 会发生极值点失稳, 承载力突然下降. 在实际情况下为芯板断裂或者失效, 再去推拉 BRB, 就会出现内核与外套筒脱开或者两端过渡区相对变形过大从而整体失稳; 当 $b_c/t_c \geq 15.21$ 时, 才能满足 CP 状态的要求; 当 $\alpha = 0.4$ 时, 宽厚比大于 12.38 的内核截面不会发生极值点失稳; 对于 L-BRB, 宽厚比对试件的承载力大小影响不大. 内核宽厚比增加, 外约束的用钢量对应的减少. 因为在约束比保持一致的情况下, 宽厚比的增加会减少对外约束的挤压力, 所需的刚度降低, 即截面模量较小, 所以宽厚比较大的构件更加绿色、经济. 但在不改变截面面积的情况下, 随着宽厚比的增加, 会导致低周疲劳性能和延性的降低, 增加了过早断裂的风险. 综合影响因素, 建议对于 SC-BRB 内核宽厚比限值为 15.



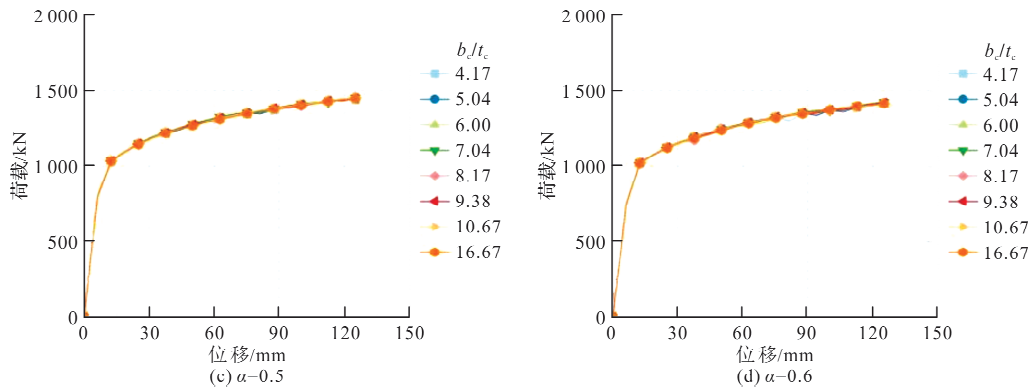


图7 宽厚比参数分析

Fig. 7 Analysis of width-thickness ratio

3.2 外约束长度的影响

内核板的屈服段和过渡段应该被外约束包裹,因此理论上具有较短的屈服段的内核板只需要相应的较短的外约束。但随着屈服段长度的减少,越容易发生平面外失稳,因为屈服段的抗弯刚度与连接段相差较大,容易在薄弱的位置产生塑性铰。本文进行参数分析,研究 SC-BRB 所需的最短外约束长度。

按照第一节 BRB 的尺寸设置:设内核过渡段长度 $L_c = 0.05L$, 屈服段长度 $L_b = \alpha L$, 连接段长度 $L_d = (0.9 - \alpha)L/2$, 外约束长度取值范围: $(0.05 + \alpha)L \leq L_w \leq 0.7L$, 取集中因子 $\alpha = 0.2 \sim 0.6$ 构件进行分析。按上节加载方法对不同外约束长度进行研究。

由图 8 可知,当 $\alpha = 0.2$, $L_w \leq 0.4L$ 时,荷载-

位移曲线出现了极值点失稳,失稳时支撑绕弱轴方向发生失稳,并且在内核和外约束端部的连接处产生较大的变形;当 $\alpha = 0.3$, $L_w > 0.4L$ 时,承载力随着位移的增加稳定增长;当 $\alpha = 0.4$, $L_w \leq 0.45L$ 时,出现极值点失稳现象。当集中因子 $\alpha \geq 0.5$ 时,外约束段长度的变化对其性能基本不造成影响。

对于 SC-BRB,随着集中因子的增大,外约束最短长度也随之增大,在 $\alpha = 0.2$ 时,外约束最短长度为 $0.4L$;在 $\alpha = 0.3$ 时,外约束最短长度为 $0.4L$;在 $\alpha = 0.4$ 时,外约束最短长度为 $0.5L$ 。对于集中因子大于 0.5 的 BRB,外约束基本不对其性能产生影响。短屈服段更容易产生局部失稳问题,通过对外约束最短长度的限制,对于 $\alpha < 0.5$ 的 SC-BRB,建议外约束长度应不小于支撑总长的 $1/2$ 。在保证不发生局部失稳的情况下,节约钢材。

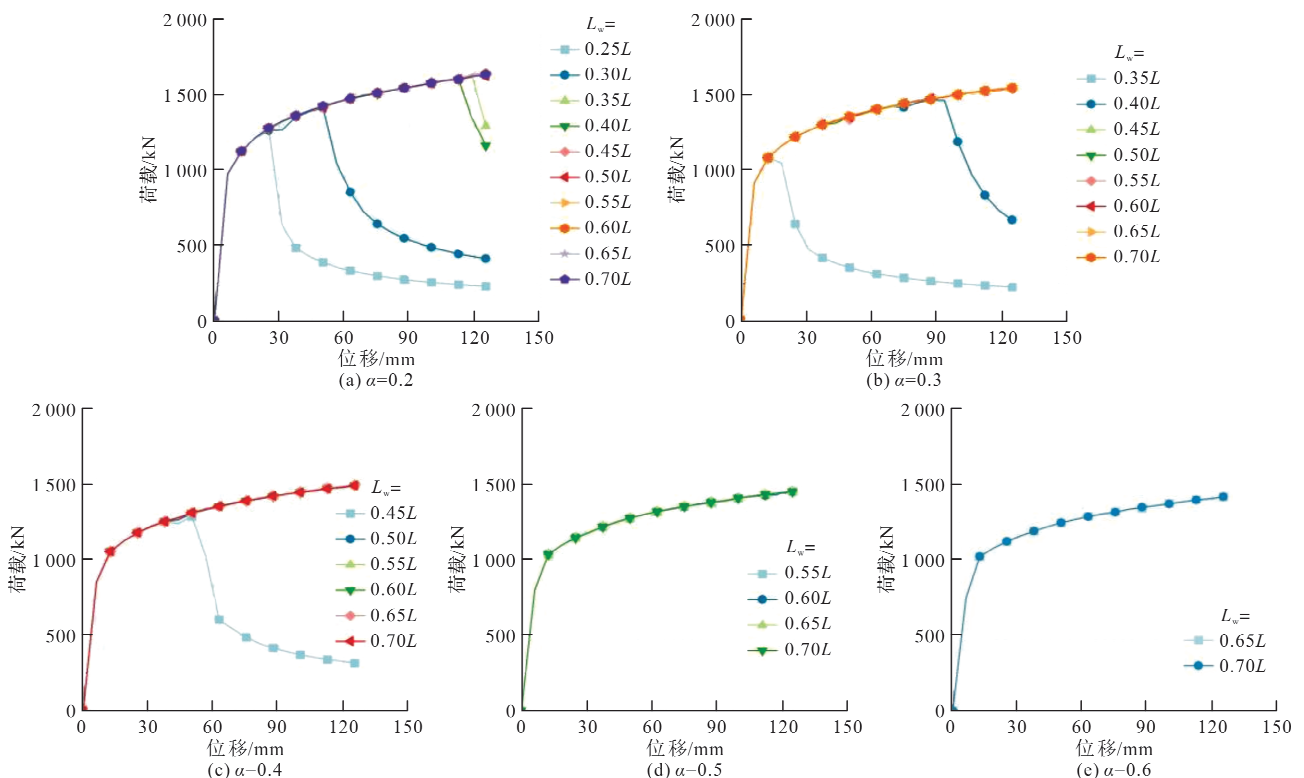


图8 外约束长度的影响

Fig. 8 Influence of external constraint length

3.3 摩擦力的影响

屈曲约束支撑的内核与外约束之间存在一定的距离,给予内核板因屈曲和泊松效应产生变形的空间.在内核受压屈服后发生形变与外约束接触,产生摩擦力.通常在间隙中填入无粘结材料来减小疲劳磨损影响.钢材之间的摩擦系数 μ 为0.3^[21],内核板与外约束之间填充无粘结材料以此减小摩擦系数.现通过改变摩擦系数来研究摩擦力对BRB荷载位移-曲线的影响,并探究合适的摩擦系数.

计算结果如图9所示,在摩擦系数不变的条件下,SC-BRB对摩擦系数更为敏感. $\mu=0.1$ 时, $\alpha=0.2$ 的BRB加载至112.3 mm处承载力突然增大,内核在轴力的作用下发生高阶多波屈曲,随着加载位移的增大,面外变形超过一定程度,内

核与外约束由最初的点接触变成面接触,内核板一侧与外约束大范围接触,进一步增大了摩擦力,因此,导致最大承载力突然增大. $\mu=0.3$ 时, $\alpha=0.2$ 的BRB加载至113.5 mm处发生极值点失稳,因摩擦系数较大,产生了过大的摩擦力.在集中因子不变的条件下, $\mu=0.1$ 荷载-位移曲线与无摩擦相差不大,说明无粘结材料采用摩擦系数为0.1的无粘结材料已基本满足要求; $\mu=0.3$, $\alpha=0.2$ 时曲线呈现极值点失稳现象,对 $\alpha=0.7$ 曲线,荷载-位移曲线稳定无退化.

综上所述,减小支撑的屈服段长度时,应该严格控制钢板表面粗糙程度,选择摩擦系数较小的无粘结材料以减小摩擦力对支撑性能的影响,提高支撑抗疲劳能力,建议无粘结材料表面摩擦系数不超过0.1.



图9 不同条件下BRB的荷载位移-曲线

Figure 9 Load-displacement curve of BRB under different conditions

4 结论

(1)屈服段长度对BRB的滞回性能有较大的影响,屈服段长度变小,BRB较早地进入耗能阶段,拥有较高的耗能效率,但SC-BRB的低周疲劳性能较差,过短的屈服段长度可能会导致支撑提前丧失承载力退出工作.适当的减小屈服段长度可保证BRB具有稳定并且足够的耗能能力;

(2)随着宽厚比的增加,外约束的用钢量减小,提高了经济性.在不改变截面面积的情况下,随着宽厚比的增加,会导致低周疲劳性能和延性的降低,增加了过早断裂的风险.综合影响因素,建议对于SC-BRB内核宽厚比限值为15;

(3)外约束所需的最短长度随着集中因子 α 的增大而增大,建议最短外约束长度取屈服段长度和0.5倍支撑总长中的较大值;

(4)摩擦系数对SC-BRB影响显著,屈服段变短后,内核板与外约束之间的挤压力增大,间隙摩擦力增大,建议SC-BRB选取摩擦系数不大于0.1的无粘结材料.

参考文献 References

- [1] 李国强,孙飞飞,邓仲良,等.屈曲约束支撑抗震性能试验研究[J].建筑结构,2014,44(18):71-78.
LI Guoqiang, SUN Feifei, DENG Zhongliang, et al. Experimental study on the seismic performance of buckling-restrained braces[J]. Building Structure, 2014, 44(18): 71-78.
- [2] ABDUL S. A review of buckling-restrained braced frames for seismic protection of structures[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2022:103203.
- [3] GHOWSI A F, SAHOO D. Fragility assessment of

- buckling-restrained braced frames under near-field earthquakes[J]. Steel & Composite Structures, 2015, 19(1): 173-190.
- [4] SABELLI R, MAHIN S, CHANG C. Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces[J]. Engineering Structures, 2003, 25(5): 655-666.
- [5] FAHNESTOCK L A, SAUSE R, RICLES J M. Seismic response and performance of buckling-restrained braced frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 133(9): 1195-1204.
- [6] 王凤欣,陈银,王高峰,等.屈曲约束支撑研究进展综述[J].河北工程大学学报(自然科学版),2012,29(4):28-31,36.
WANG Fengxin, CHEN Yin, WANG Gaofeng, et al. Review on the development of buckling-restrained braced[J]. Journal of Hebei University Engineering (Natural Science Edition), 2012, 29(4): 28-31,36.
- [7] EROCHKO J, CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R, et al. Residual drift response of SMRFs and BRB frames in steel buildings designed according to ASCE 7-05[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(5): 589-599.
- [8] KARIMI M, YAGHIN M, NEZHAD R, et al. Seismic behavior of steel structure with buckling-restrained braces[J]. Jordan Journal of Civil Engineering, 2015, 9(4): 480-488.
- [9] 王永贵,刘丹卉,高向宇.屈曲约束支撑滞回性能的影响因素[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(2):60-69.
WANG Yonggui, LIU Danfen, GAO Xiangyu. Influencing factors of buckling-restrained brace hysteretic performance[J]. Journal of Civil & Environmental Engineering, 2019, 41(2): 60-69.
- [10] 张俊贤,白羽,刘洪义.全钢屈曲约束支撑性能影响试验研究[J].四川建筑科学研究,2021,47(2):6-11.

- ZHANG Junxian, BAI Yu, LIU Hongyi. Experimental research on effect of performance of all-steel buckling-restrained brace[J]. Sichuan Building Science, 2021, 47(2): 6-11.
- [11] PETTINGA D, CHRIS C, PAMPANIN S, et al. Effectiveness of simple approaches in mitigating residual deformations in buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 36(12): 1763-1783.
- [12] FAHNESTOCK L, RICLES J, SAUSE R. Experimental Evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 133(9): 1205-1214.
- [13] 吴长, 王秀丽, 周锐. 采用开孔式双钢管约束屈曲支撑的网壳结构减震分析与实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 637-643.
- WU Chang, WANG Xiuli, ZHOU Kun. Shaking table experimental study on vibration control of reticulated Shell with perforating double-steel tube buckling-restrained braces[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, 44(5): 637-643.
- [14] HOVEIDAE N, TREMBLAY R, RAFEZY B, et al. Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114(11): 89-99.
- [15] PANDIKKADAVATH M, SAHOO R. Mitigation of seismic drift response of braced frames using short yielding-core BRBs[J]. Steel & Composite Structures, 2017, 23(3): 285-302.
- [16] 王佼娇. 低屈服点钢防屈曲约束支撑及其框架抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- WANG Jiaojiao. Seismic performance on the buckling-restrained braces and buckling-restrained braced frames with low-yield-point steel[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [17] 姜子钦. 方矩管装配式防屈曲支撑设计理论与试验研究[DOI: 10.15986/j.1006-7930.2023.06.005]
- 研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- JIANG Ziqin. Theoretical and experimental study on design methods for double square tube assembled buckling-restrained brace[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [18] 石永久, 王萌, 王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构关系试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 293-300.
- SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing. Experimental study of structural steel constitutive relationship under cyclic loading[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3): 293-300.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构设计规程: JGJ 99—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification For Steel Structure of Tall Building: JGJ 99—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [20] 姚振纲, 刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
- YAO Zhengang, LIU Zuhua. Architectural structure experiment[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code For Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

(编辑 吴海西)

城市绕城高速服务区 TOD 开发交通可达性研究 ——以曲江服务区为例

曹 振, 张海博, 耿 娟, 田 准, 孙玉辉, 冯佳豪

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 目前, 国内外对 TOD 模式的研究与应用主要集中在轨道交通方面, 而在城市绕城高速服务区同样存在集约用地、综合开发的需求。同时, 服务区 TOD 开发将导致区域交通生成量与吸引力发生改变, 区域道路网系统和公共交通系统将会受其影响。为研究城市绕城高速服务区 TOD 开发对区域交通可达性的影响, 本文以西安绕城高速曲江服务区为例, 应用 ArcGIS 软件对曲江服务区 TOD 开发前后区域交通可达性进行分析与评价。结果表明: (1) 曲江服务区周边区域现状交

收稿日期: 2022-04-11

修回日期: 2023-11-30

基金项目: 陕西省自然科学基金项目社会发展领域(2020-SF159)

第一作者: 曹 振(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轨道交通工程、地下工程与隧道工程、岩土工程。E-mail: 653102531@qq.com

通信作者: 张海博(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为城市 TOD 综合开发。E-mail: 2509312107@qq.com