

新型钢板装配式屈曲约束支撑有限元分析*

尹绕章, 邓雪松, 周 云

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 提出一种新型钢板装配式屈曲约束支撑, 介绍了其构造和特点, 采用有限元软件 ABAQUS 对不同数量螺栓、不同端部构造方式的 6 个模型进行分析。结果表明: 新型钢板装配式屈曲约束支撑具有稳定的滞回耗能能力, 螺栓间距应小于两倍的核心单元波长, 提出的端部嵌入式构造方式对端部有较明显的加强作用。

关键词: 屈曲约束支撑; 装配式; 有限元分析; 滞回曲线

中图分类号: TV352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)02-0288-05

0 引言

屈曲约束支撑作为一种优良的耗能减震构件, 近年来得到了越来越多的研究和应用 (Xie, 2005; 汪家铭, 中岛正爱, 2005; 周云, 2007; 刘晴云等, 2009; 周云等, 2012)。典型的屈曲约束支撑主要由核心单元和外约束单元构成。在地震作用下, 由于外约束单元的限制, 核心单元能够实现屈服而不屈曲, 从而大大提高支撑的耗能能力。传统的屈曲约束支撑通常采用钢与混凝土组合形成外围约束, 这类构件的制作精度要求高, 自重较大且施工难度大。另外, 由于屈曲约束支撑核心单元耗能段和连接段之间会形成薄弱区域, 如若处理不当, 支撑端部会出现局部屈曲, 影响整个支撑的性能 (Ju *et al.*, 2009; Takeuchi *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2012)。

针对已有屈曲约束支撑的缺点, 本文提出一种新型钢板装配式屈曲约束支撑, 改进了端部的加强措施, 利用 ABAQUS 软件对其进行数值分析, 研究螺栓数量, 端部不同构造对屈曲约束支撑耗能性能和承载力的影响。

1 新型钢板装配式屈曲约束支撑的构造与特点

新型钢板装配式屈曲约束支撑主要由核心单

元、外约束板、垫板、加劲板、端部盖板等组成, 其整体图、分解图如图 1a、b 所示。核心单元、外约束板、垫板和端部盖板通过高强螺栓装配成一体, 核心单元与外约束构件之间留有一定的间隙, 以此来提供核心受力单元受压过程中由于泊松效应产生的横向变形所需的空間, 加劲板与核心单元的连接段焊成一体, 加劲板与外约束板件留有变形缝, 采用嵌入式构造, 并用端部盖板对其进行加强 (图 1c)。

该新型钢板装配式屈曲约束支撑具备以下几个特点: (1) 支撑完全由钢板组成, 构造简单, 取材容易, 自重轻; (2) 外约束构件由螺栓装配而成, 可以方便拆解, 在地震后可检查核心单元的受损情况, 必要时可进行更换, 节约资源; (3) 支撑端部采用嵌入式构造, 加劲板与外约束板端部相互咬合, 使该支撑在受压时端部薄弱区域可得到更大程度上的保护。

2 模型设计

针对螺栓数量, 端部不同构造对屈曲约束支撑性能的影响, 设计两组试件, 分别为 A 组 APB-1 ~ APB-5, B 组 APB-6。其中 APB-1 ~ APB-5 端部采用嵌入式构造, 螺栓个数分别为 6、10、18、28、42, 相对应的 L_b/L_w 分别为 4.5、2.2、1.2、0.7、0.5, L_b 为螺栓间距, L_w 为核心单元

* 收稿日期: 2013-10-10.

基金项目: 广东自然科学基金研究团队项目 (83510091000001)、广东省自然科学基金项目 (S2012010009866)、广州市属高校“羊城学者”首席科学家项目 (10A0625) 和广州市教育系统创新学术团队项目 (穗科教 [2009] 11 号) 联合资助。

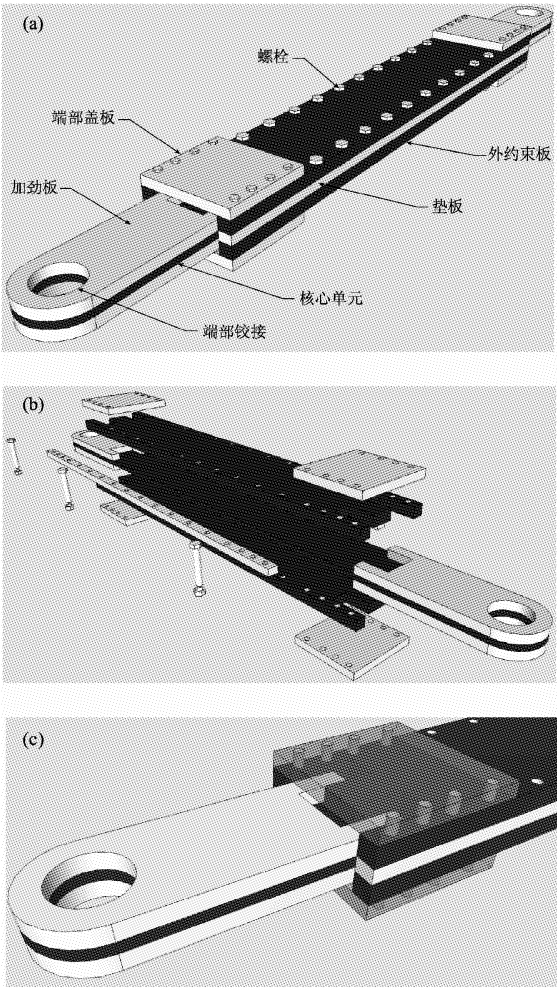


图 1 新型钢板装配式屈曲约束支撑

(a) 整体图；(b) 拆解图；(c) 端部透视图

Fig. 1 The schematic drawing of the novel type of steel plate assembled buckling restrained brace

(a) the whole diagram; (b) decomposition diagram;
(c) front end perspective diagram

波长，由 Chou 等（2010）确定；为简化模型，仅 APB-5 端部加盖板，APB-6 端部设加劲肋，APB-5 和 APB-6 模型三维图如图 2 所示；各个试件外约束单元和核心单元主要尺寸相同，如表 1 所示。核心受力单元采用 Q235 钢，外钢板、盖板、加劲板和垫板皆采用 Q345 钢，螺栓为 8.8 级高强螺栓。

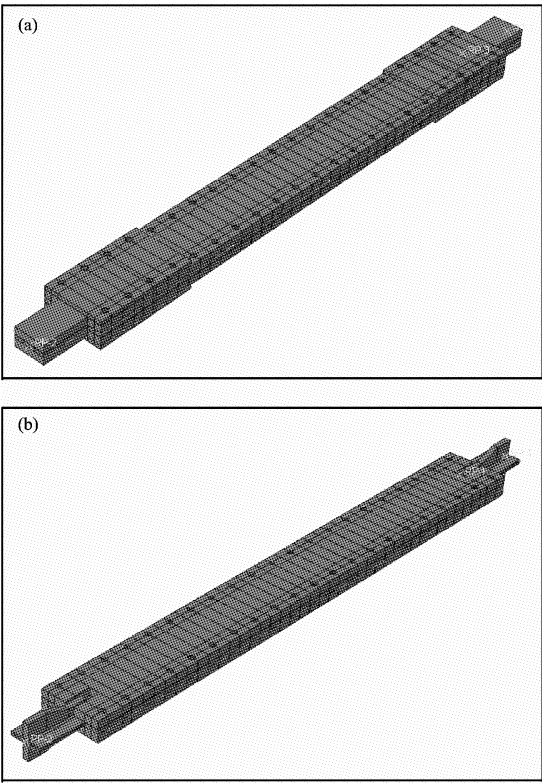


图 2 试件三维模型图

(a) APB-5；(b) APB-6

Fig. 2 3D model of specimens

表 1 试件主要尺寸

Tab. 1 Main dimension of the specimens

试件	核心受力钢板	外约束钢板	钢垫板	螺栓		
	$L_c \times B_c \times T_c$ (长×宽×厚)/mm	$L_r \times B_r \times T_r$ (长×宽×厚)/mm ³	$L_s \times B_s \times T_s$ (长×宽×厚)/mm ³	个数	间距/mm	$\frac{L_b}{L_w}$
APB-1	1 600×80×10	1 360×155×20	1 360×36×13	6	650	4.5
APB-2	1 600×80×10	1 360×155×20	1 360×36×13	10	325	2.1
APB-3	1 600×80×10	1 360×155×20	1 360×36×13	18	162.5	1.2
APB-4	1 600×80×10	1 360×155×20	1 360×36×13	28	100	0.7
APB-5	1 600×80×10	1 360×155×20	1 360×36×13	42	65	0.5
APB-6	1 600×80×10	1 360×155×20	1 360×36×13	42	65	0.5

注： L_c 表示核心板总长， B_c 表示核心板宽度， T_c 表示核心板厚度； L_r 表示外约束板总长， B_r 表示外约束板宽度， T_r 表示外约束板厚度； L_s 表示垫板总长， B_s 表示垫板宽度， T_s 表示垫板厚度； L_b 为螺栓间距， L_w 为波长；强弱轴方向间隙皆为 1.5 mm。

3 有限元模型的建立

3.1 单元的选择与材料本构

利用 ABAQUS/Standard 分析模块进行建模。所有构件均采用 C3D8R 单元模拟, 考虑钢材的包辛格效应, 采用双线性随动强化模型, 钢材的弹性模量取 $E_s=206\ 000\text{ MPa}$, 切线模量 $E_t=0.02E_s$, 泊松比取为 0.3。

3.2 接触定义

核心板与外约束接触面法向作用采用“硬接触”, 不考虑核心板与外约束之间的摩擦作用, 接触面的切向作用采用 Frictionless, 默认摩擦系数为零, 选用有限滑移公式, 螺栓和螺栓孔之间采用 tie 接触。

3.3 加载制度与边界条件

模拟采用位移加载控制, 标准位移加载幅值分别为 $l/300$ (5.0 mm)、 $l/200$ (8.0 mm)、 $l/150$

(11.0 mm)、 $l/100$ (16.0 mm), l 为支撑长度 (GB50011-2010)。屈曲约束支撑的端部边界条件为一端铰接, 另一端约束住径向, 轴向加载。

4 有限元结果分析

4.1 螺栓对支撑性能的影响

4.1.1 不同螺栓间距下主要部件最大应力对比

图 3 为典型试件 APB-1 和 APB-3 的核心单元与外约束构件变形图。由变形图可知, APB-1 外约束单元出现了局部鼓曲, 外约束板最大应力达到了 381 MPa, 发生屈服; 核心单元局部应力幅值过大, 未能实现全截面屈服, 其最大应力为 390 MPa, 有可能超过其极限强度而发生破坏。APB-3 外约束构件整体性良好, 应力较小, 未出现局部失稳现象; 核心单元实现多波屈曲, 且应力沿长度方向分布均匀。可见, 螺栓间距对支撑的稳定性及部件性能的发挥有至关重要的影响。

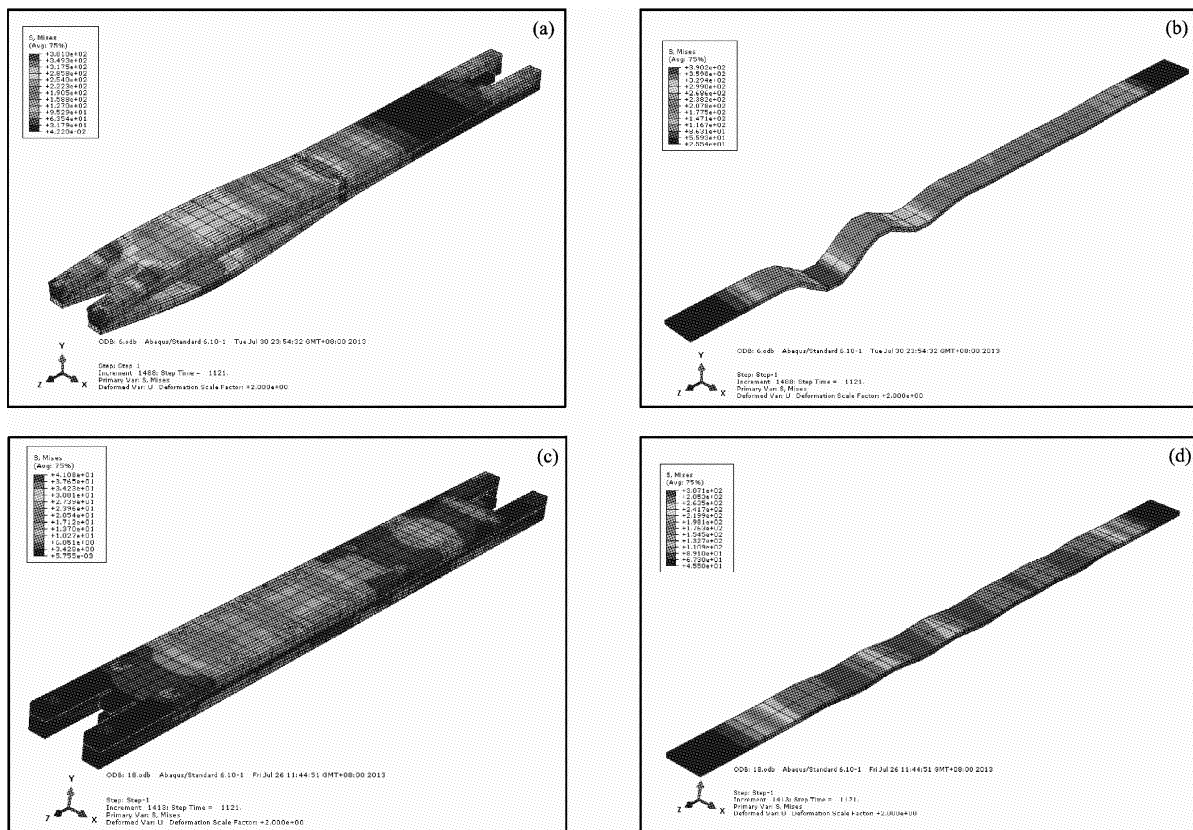


图 3 APB-1 和 APB-3 外约束构件及核心单元变形图

(a) APB-1 外约束构件; (b) APB-1 核心单元; (c) APB-3 外约束构件; (d) APB-3 核心单元

Fig. 3 Deformation of the external restraining member and core unit of APB-1 and APB-3

(a) external restraining member of APB-1; (b) core unit of APB-1; (c) external restraining member of APB-3; (d) core unit of APB-3

表2列出了不同螺栓间距下各部件最大应力，由表可得，APB-1 ($L_b/L_w = 2.1$) 各部件除加劲板外均超过了其屈服强度；APB-2 ($L_b/L_w = 2.1$) 外约束构件应力相对较大，在更大加载位移的作用下，可能会面临局部失稳的风险；而 APB-3 ~ APB-5 ($L_b/L_w < 2$) 的外约束构件的最大应力远低于其屈服应力，可见此种情况下外约束构件的整体性与稳定性可以得到有效保障。

表2 不同螺栓间距下各部件最大应力对比

Tab. 2 Maximum stress contract of various parts with different bolt spacing

最大应力 /MPa	试件				
	APB-1	APB-2	APB-3	APB-4	APB-5
核心单元	390.2	303.7	307.1	302.1	302.4
外约束板	381	148.02	71	71.24	37
垫板	351.5	78.76	15.9	14.14	6.3
螺栓	800	144	64	23.56	10.5
加劲板	54.4	71.09	77.8	70.95	67.6

4.1.2 不同螺栓间距下试件滞回曲线

图4为不同螺栓间距下试件的滞回曲线。由图4可以看出，APB-1滞回曲线出现了内缩和畸变，承载力显著下降，而APB-2 ~ APB-5的滞回曲线几乎重合，均规则饱满，承载力和耗能能力稳定。

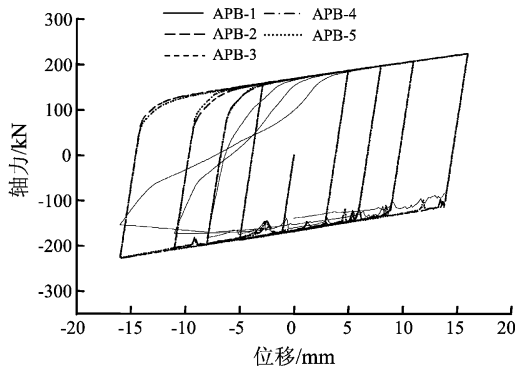


图4 APB-1 ~ APB-5 滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curves from APB-1 to APB-5

综上所述，考虑到外约束构件的整体性以及核心单元的耗能性能，建议 $L_b/L_w \leq 2$ 。

4.2 不同端部构造比较

图5为APB-5和APB-6滞回曲线，从图中可以看出，两试件滞回曲线规则饱满，耗能能力稳定，可见设加劲肋和嵌入式端部处理方式对支撑滞回性能影响不大。

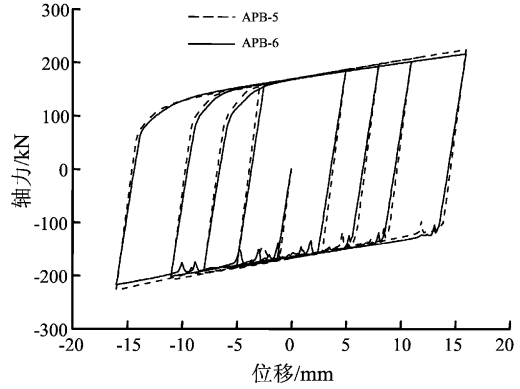


图5 APB-5 ~ APB-6 滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves from APB-5 to APB-6

图6为APB-5及APB-6核心单元轴向应力随着支撑两端长度方向的分布图，对比的端部长度约为270 mm（核心单元伸出外约束构件处到支撑末端的长度范围）。在加载端对比的长度范围内，APB-5核心单元平均应力约为112 MPa，

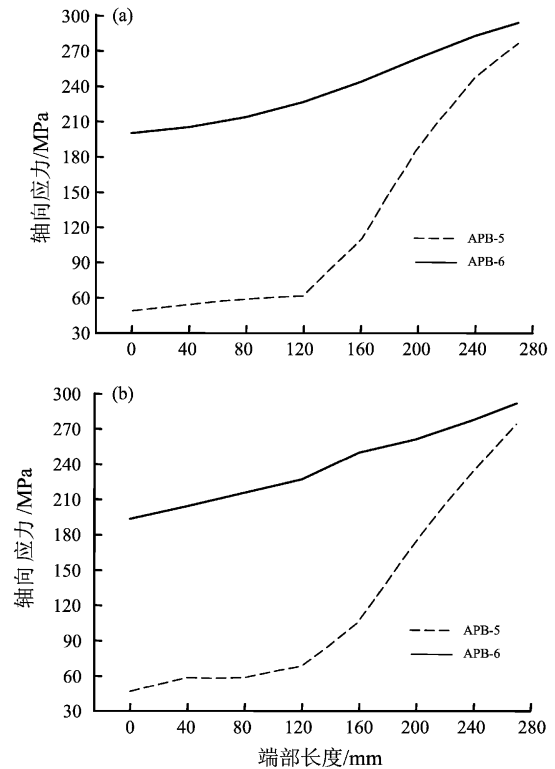


图6 APB-5和APB-6核心单元轴向应力沿支撑两端长度方向的分布图

(a) 加载端；(b) 铰接端

Fig. 6 Distribution of axial stress on the core unit of APB-5 and APB-6 along axial length of the support ends

(a) loading end；(b) hinged end

APB-6 核心单元平均应力约为 235.68 MPa, 相差约 50%; 在铰接端对比的长度范围内, APB-5 核心单元平均应力约为 119 MPa, APB-6 核心单元平均应力约为 237.2 MPa, 相差约 49%。可见, APB-5 相比 APB-6 而言, 端部应力有较大幅度的降低。

由以上分析可以得到: 相比设加劲肋构造, 嵌入式构造对支撑端部有较为明显的加强作用, 能降低端部发生失稳破坏的可能性。

5 结论

(1) 新型钢板装配式屈曲约束支撑滞回曲线饱满, 具有稳定的耗能能力。

(2) 螺栓间距对支撑有至关重要的影响, 建议 $L_b/L_w \leq 2$ 。

(3) 新型钢板装配式屈曲约束支撑端部嵌入式构造对支撑端部有较为明显的加强作用。

感谢周云老师对本研究工作的悉心教导和帮助。

参考文献:

- 刘晴云, 闫锋, 汪大绥, 等. 2009. 屈曲约束支撑在磁浮虹桥站结构设计中的应用[J]. 建筑钢结构进展, 4(11): 27-35.
- 汪家铭, 中岛正爱. 2005. 陆烨, 译. 屈曲约束支撑体系的应用与研究进展(I)[J]. 建筑钢结构进展, 7(1): 1-12.
- 周云, 唐荣, 钟根全, 等. 2012. 防屈曲耗能支撑研究与应用的新进展[J]. 防灾减灾工程学报, 32(4): 393-407.
- 周云. 2007. 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.
- Chou C. C., Chen S. Y.. 2010. Subassembly tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces[J]. Engineering structures, 32(8): 2108-2112.
- GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].
- Zhao J. X., Wu B., Ou J. P.. 2012. Effect of brace end rotation on the global buckling behavior of pin-connected buckling-restrained braces with end collars[J]. Engineering Structures, 40: 240-253.
- Takeuchi T., Hajjar J. F., Matsui R., et al. 2010. Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 66(2): 139-149.
- Xie Q. 2005. State of the Art of Buckling-restrained Braces in Asia[J]. Journal of construction Steel Restrained, 61(6): 727-748.
- Ju Y. K., Kim M. H., Kim J., et al. 2009. Component tests of buckling-restrained braces with unconstrained length[J]. Engineering structures, 31(2): 507-516.

Finite Element Analysis on a Novel Type of Steel Plate Assembled Buckling-restrained Brace

YIN Rao-zhang, DENG Xue-song, ZHOU Yun

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract

A novel type of steel plate assembled buckling-restrained brace (APB) has been developed and the structure and characteristic of APB has been introduced. Six models with different number of bolts and end structures are simulated by the finite element software ABAQUS. The analysis results indicate that the APB has the excellent hysteretic performance, the ratio of bolt spacing to core wavelength should be less than two, and the provided embedded end structure has obviously strengthened the end of the brace.

Key words: buckling-restrained brace; assembled; finite element analysis; hysteretic curve