

# 屈曲约束支撑力学模型对比分析

周小林, 雷劲松

(西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 屈曲约束支撑分析中主要有两种力学模型: 平滑非线性的 Bonc - Wen 模型和简单双折线的模型。为了对比分析这两种模型在结构中模拟屈曲约束支撑的区别, 结合试验模型进行了非线性时程分析。根据屈曲约束支撑构造特点, 基于串联刚度模型构造了支撑的力学公式, 由于一般连接点区域刚度较大, 通过假设连接段刚度无限大来简化力学模型。同时引入超强系数来修正支撑屈服力以体现对支撑芯材强度提高作用。基于一个两层单跨人字屈曲约束支撑钢框架的试验模型, 应用 SAP2000 有限元软件, 分别建立 Bonc - Wen 和双线性模拟的屈曲约束支撑, 并进行非线性动力时程分析。通过分析得出两种模型的顶点加速度、层间位移、层间位移角的响应, 并与实验结构进行对比分析。结果表明: 总体上两种模型差距不大, 但屈服刚度平滑过度的 Bonc - Wen 模型比屈服刚度突变的双折线模型模拟屈曲约束支撑更为接近试验结果。

**关键词:** 屈曲约束支撑; Bonc - WEN; 双线性; 非线性时程

**中图分类号:** TU352.1

**文献标志码:** A

## 引 言

屈曲约束支撑 (Buckling Restrained Brace, 简称 BRB) 是近年来一种逐渐被广泛采用的新型耗能减震装置, 主要通过其非线性弹塑性变形消耗地震能量, 从而达到减震效果。与传统钢支撑不同, 屈曲约束支撑在拉压受力下都不会发生支撑的稳定性破坏, 拉压受力都能表现出钢材的材料屈服特性。通过适当的设计, 屈曲约束支撑在小震作用下可以保持弹性状态工作, 而在大震作用下发挥其钢材的塑性屈服耗能特长<sup>[1]</sup>。因此, 屈曲约束支撑在建筑结构中的应用备受关注, 其可应用于钢框架、加强层、以及用作耗能减震的阻尼器<sup>[2-3]</sup>。

国内外已经对屈曲约束支撑作了广泛的试验及理论研究<sup>[4-12]</sup>。对屈曲约束支撑的特性也提出了各种模型<sup>[6-8, 12]</sup>。至今在工程应用中还未具有一套统一的屈曲

约束支撑设计理论。本文针对现阶段屈曲约束支撑在建筑结构工程中的应用情况, 结合以往研究对典型屈曲约束支撑的试验研究结果<sup>[10]</sup>进行屈曲约束支撑力学性能的对比较分析研究。

## 1 屈曲约束支撑分析模型

### 1.1 屈曲约束支撑构造

屈曲约束支撑主要由约束耗能段、连接段组成, 如图 1 所示<sup>[4]</sup>。

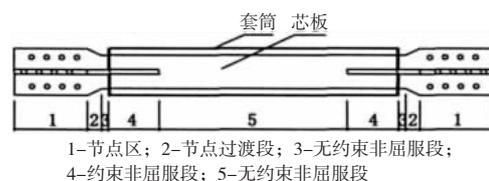


图 1 屈曲约束支撑构造图

收稿日期:2015-08-14

作者简介:周小林(1991-),男,四川华蓥人,硕士生,主要从事工程结构减隔震方面的研究,(E-mail)lin2694@126.com

由于约束屈服段有套筒及内填无粘结材料的约束,芯材不会在受压时先于材料屈服而产生屈曲失稳。为了保证芯材的稳定性,芯材的截面一般相对于外套筒较小。为了保证非约束段(节点连接区和过渡区)的稳定性,节点区和过渡区的截面面积相对于芯材也大。

从屈曲约束支撑的构造原理可以看出,屈曲约束支撑的力学性能主要由约束屈服段体现。

### 1.2 屈曲约束支撑力学特征

普通钢支撑在受压力时往往整体失稳先于材料屈服。整体稳性破坏,是一种应当避免的结构破坏机制。工程设计中为了保证钢支撑的稳定性,不得不把钢支撑截面设计得非常大。与传统钢支撑不同的是:在轴向力(拉压)作用下,屈曲约束支撑都能进入材料塑性状态,拉压的变形-力曲线基本对称<sup>[6]</sup>,克服了传统支撑的缺点,如图 2 所示。

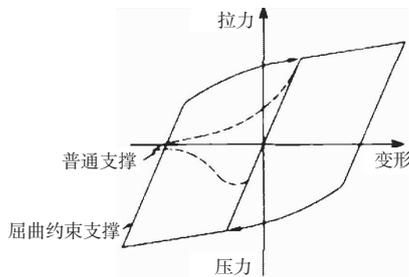


图 2 普通支撑与屈曲约束支撑性能对比

### 1.3 屈曲约束支撑恢复力模型的选择

目前对弹塑性构件的骨架模型主要有:双线性、多线性和非线性模型。塑性强化类型有等向强化、随动强化和混合强化。

大量的试验研究表明:屈曲约束支撑的塑性行为基本类似钢材的塑性行为<sup>[9]</sup>。因此目前屈曲约束支撑弹塑性模型主要用双线性随动强化模型(Bilinear Kinematic,简称 BKIN)和 Bouc - Wen 模型<sup>[2]</sup>。

双线性随动强化模型认为支撑由弹性进入塑性时刚度直接从弹性刚度突变到屈服后刚度,模型参数设置较简单,如图 3 所示。

Bouc - Wen 模型则视构件由弹性进入塑性时刚度平滑过度到屈服后刚度。其平滑程度取决于指数  $n$ 。当  $n \rightarrow \infty$  时,接近双折线模型,如图 4 所示。一般取  $n = 1 \sim 20$ <sup>[9,11]</sup>。

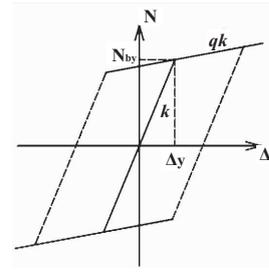


图 3 双线性随动强化模型

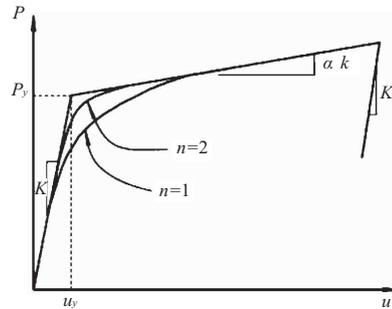


图 4 Bouc - Wen 模型

### 1.4 屈曲约束支撑恢复力参数确定

根据以往对屈曲约束支撑的试验研究,屈曲约束支撑的力学参数主要有:初始刚度、屈服后刚度和屈服力。

#### 1.4.1 屈曲约束支撑屈服刚度 $K$ 确定

屈曲约束支撑的刚度可看成由约束屈服段、连接段串联而成。根据刚度串联模型,屈曲约束支撑刚度为:

$$K = \frac{1}{1/K_y + 2/K_{con}} \tag{1}$$

式中:  $K$  为屈曲约束支撑整体刚度,  $K_y$  为屈服段刚度,  $K_{con}$  为连接段刚度。

由于一般屈曲约束支撑连接段刚度相对于屈服段的刚度大,所以可以忽略连接段的刚度,简单地只考虑屈服段的刚度<sup>[5]</sup>,即取:

$$K = \frac{EA_y}{L_y} \tag{2}$$

#### 1.4.2 屈曲约束支撑屈服力 $F_y$ 确定

屈服约束支撑的轴力下屈服首先发生于约束耗能段。从大量的实验得知,在拉力作用下,屈曲约束支撑的屈服特征无无异于普通钢材的拉伸试验。但在压力荷载作用下,由于约束材料的作用,使芯材处于三向受力状态,屈曲约束支撑的屈服力略高于拉伸时的屈服力。高出的程度与芯材的强度、约束的程度有关<sup>[11]</sup>。

大量试验表明,对于常规的 BLY160 ~ Q235 钢材的

拉压不对称性并不显著,可认为支撑的拉压力学特征对称<sup>[5]</sup>。屈曲约束支撑芯材实际屈服强度高于名义屈服强度,其程度与钢材强度有关,一般的结构用钢可通过超强系数<sup>[7]</sup>调整。屈曲约束支撑的屈服力计算公式:

$$F_y = \eta \cdot f_y \cdot A_{cor} \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为芯材超强系数, $f_y$ 为屈曲约束支撑的等效截面屈服强度, $A_{cor}$ 为屈服段芯材截面面积。芯材的超强系数为实测屈服强度与名义屈服强度比值,没有实测强度时一般可按表 1<sup>[6]</sup>取用。

表 1 不同材料对应超强系数

材料型号	$\eta$
Q100LY	1.25
Q160LY	1.10
Q225LY	1.10
Q235	1.15
Q345	1.10
Q390、Q420	1.05

### 1.4.3 屈曲约束支撑屈服后刚度

屈曲约束支撑屈服后,刚度 $K_1$ 可由弹性刚度乘以强化系数计算:

$$K_1 = K \cdot \alpha \quad (4)$$

强化系数 $\alpha$ 可取 0.01 ~ 0.05<sup>[6]</sup>,一般屈曲约束支撑可取 0.02。

## 2 试验对比分析

为了对比双线性模型和 Bouc - Wen 模型对屈曲约束支撑模拟的合理性,本文以文献 5 中的试验模型为依据进行数值模拟分析。

### 2.1 试验模型

该试件为两层单跨钢框架结构<sup>[6]</sup>,平面尺寸为 4.5 m × 3 m,层高均为 2.25 m。框架梁柱截面尺寸为 H200 × 160 × 8 × 12,钢材型号为 Q235。每层装配 100 mm 厚压型钢板组合楼板,并配有 10 kN/m<sup>2</sup> 质量块。在纵向每层每榀框架设置对称的 BRB 人字撑。框架试件尺寸如图 5 所示。

所采用的 BRB 源自文献[2,6]。其中芯材的钢号为 Q235,芯材宽 60 mm,厚 8 mm,面积 480 mm<sup>2</sup>,屈服段长 1213 mm。约束筒截面尺寸为 170 mm × 170 mm × 20 mm,如图 6 所示。

### 2.2 分析模型及参数

使用有限元分析软件 SAP2000 建模分析。为体

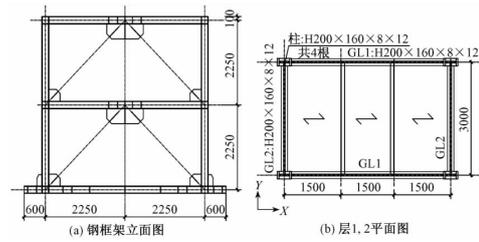


图 5 试件尺寸

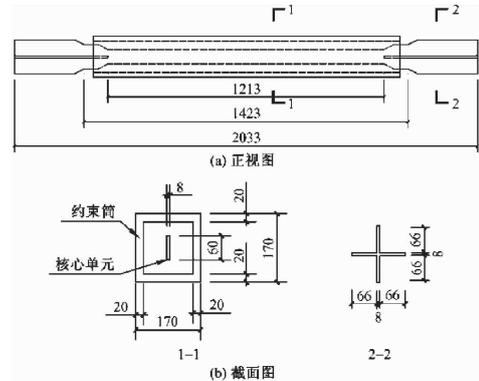


图 6 BRB 试件示意图

现屈曲约束支撑模型区别,建立对比的两个有限元模型。

根据试验模型,钢框架梁柱均采用 SAP2000 中的“框架单元”,每根梁柱构件划分 2 个单元。“框架单元”还能指定集中塑性铰以考虑其非线性特性。本文模型分别在框架单元的两端相对长度为 0.1 位置设置 PMM 集中塑性铰(由于支撑的设计,使框架梁承受较大的轴向力)。楼板单元用“膜单元”,在本模型中仅起传递荷载作用。

为了与试验结果对比分析,每个模型输入地震工况与文献[10]相同,波型为 EL - Centro,输入地震波形如图 7 所示。

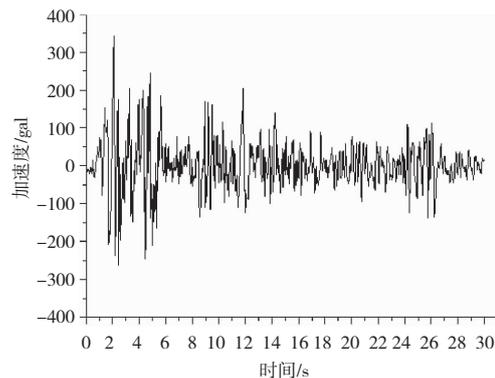


图 7 输入地震波形图

通过调速比例系数得到不同输入地震加速度峰值大加速度。模型 1BRB 采用 WEN 模型,模型 2BRB 采用双线性模型。两个模型参数设计见表 3。

表 2 输入工况

工 况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
加速度峰值/g	0.10	0.20	0.30	0.44	0.56	0.68	0.78	1.02
比例系数/ $10^{-3}$	2.868	5.736	8.604	12.6	16.1	19.5	22.4	29.3

注:g 为重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$

表 3 模型参数

项 目	模型 1	模型 2	备 注
梁柱单元类型	框架单元	框架单元	集中塑性铰 P - MM 铰
楼板模型	膜单元	膜单元	
楼面荷载	10 kN/m <sup>2</sup>	10 kN/m <sup>2</sup>	
输入地震波峰值加速度	工况 1 ~ 工况 8	工况 1 ~ 工况 8	
BRB 屈服类型	WEN	双线性	
BRB 弹性刚度	81.52 kN/m	81.52 kN/m	不考虑连接段影响
BRB 屈服后刚度比	0.02	0.02	
BRB 屈服指数 n	2	—	

### 3 结果分析

图 8 和图 9 分别是模型 1 和模型 2 在工况 4(峰值加速度 0.44 g)的顶点位移时程曲线。可以看出,模型 2 反应比模型 1 更大。

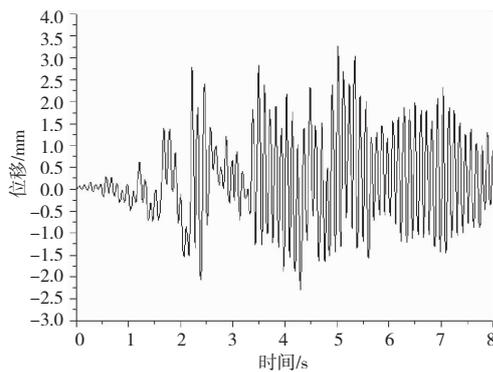


图 8 模型 1 工况 4 顶点位移时程曲线

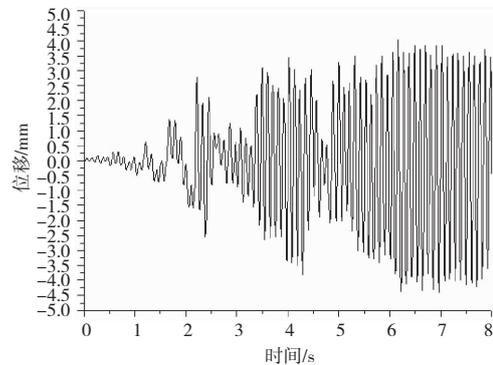


图 9 模型 2 工况 4 顶点位移时程曲线

图 10 和图 11 分别是模型 1 和模型 2 在工况 4(峰值加速度 0.44 g)的 BRB 支撑的位移 - 轴力滞回曲线。可以看出,模型 2 反应比模型 1 更为“刚硬”。其原因是 Bouc - Wen 模型的支撑比 BKIN 模型更早进行塑性, BKIN 模型一旦进入塑性刚度就突变。

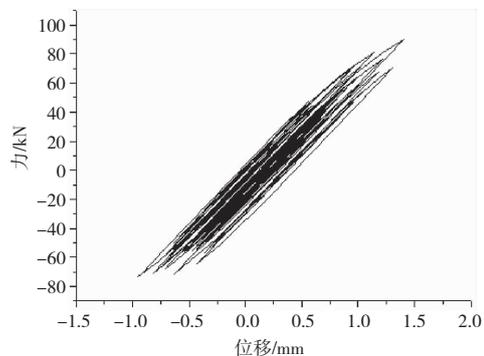


图 10 模型 1 工况 4 支撑力 - 位移曲线

图 12 和图 13 分别是试验模型在各种工况下第一层和第二层的绝对加速度反应与文献[6]的试验数据的对比分析。

从图 12、图 13 对比分析图可以看出, Bouc - Wen 模

型比 BKIN 模型更加接近试验值。BKIN 模型的支撑反应值偏差较大。其中 Bouc - Wen 模型与试验值基本相同,其原因有两方面:

(1)对支撑刚度计算中假设刚度无限大,未考虑连接区段的变形,致使其刚度较真实情况偏小,以至比试

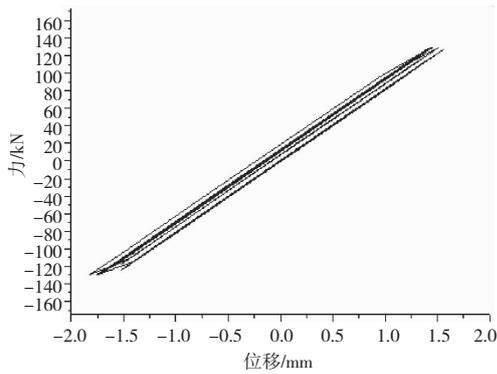


图 11 模型 2 工况 4 支撑力 - 位移曲线

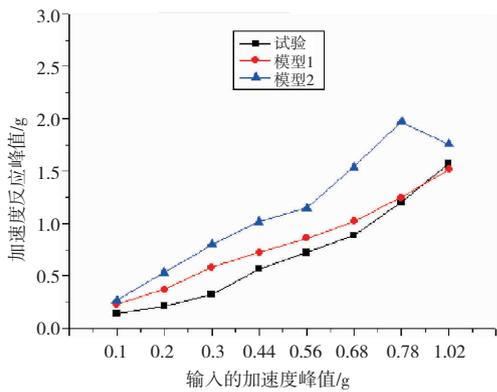


图 12 一层加速度反应对比

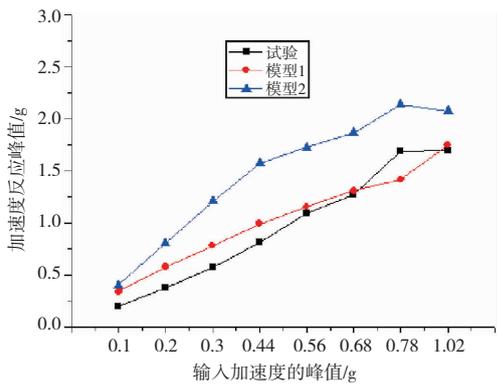


图 13 二层加速度反应对比

验值加速度反应偏大。

(2) 芯材的弹性模量取的理论值、屈服强度简单地将名义屈服强度乘以增大系数,增大系数在本试验中偏小。

#### 4 结论

(1) 屈曲约束支撑的刚度可仅考虑芯材对刚度的贡献,假设连拉段以刚度无限大是较合理的。

(2) 模型屈服约束支撑的力学性能,用 Bouc - Wen

模型比双线性模型更为合理、准确。

屈曲约束支撑的芯材强化系数、弹性模型的计算应当做更进一步的研究,本文试验中强化系数较真实值偏小。如果能得出更准确的强化系数、芯材的弹性模型, Bouc - Wen 模型的准确、合理性将更进一步提高。在屈曲约束支撑的设计应用时,有条件的情况下,应对同生产批次的屈曲约束支撑芯材做试验,测定其屈服强度、弹性模量和屈服后强化系数。以试验值建立支撑的 Bouc - Wen 力学模型。

#### 参考文献:

- [1] 宋健.屈曲约束支撑的受力性能及应用分析[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
- [2] 任重翠,徐自国,肖从真,等.防屈曲约束支撑在超高层建筑结构伸臂桁架中的应用[J].建筑结构,2013,43(5):54-59.
- [3] 朱川海,赵昕,张鸿玮.带屈曲约束支撑超高层建筑结构优化设计[J].建筑结构,2014,44(S1):251-255.
- [4] 罗开海,孔祥雄,程绍革.一种新型屈曲约束支撑的研制与试验研究[J].建筑结构,2010,40(10):1-6.
- [5] 王佼佼,石永久,严红,等.低屈服点全钢防屈曲支撑抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2013,46(10):10-16.
- [6] 李国强,孙飞飞,陈素文,等.大吨位国产 TJII 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.
- [7] 胡大柱,李国强,孙飞飞,等.屈曲约束支撑铰接框架足尺模型模拟地震振动台试验[J].土木工程学报,2010,43(增刊):520-525.
- [8] 孔祥雄,罗开海,程绍革.含有屈曲约束支撑平面框架的抗震性能试验研究[J].建筑结构,2010,40(10):7-10.
- [9] 罗开海,程绍革,白雪霜,等.屈曲约束耗能支撑力学性能分析[J].工程抗震与加固改造,2007,29(2):23-32.
- [10] 程绍革,罗开海,孔祥雄.含有屈曲约束支撑框架的振动台试验研究[J].建筑结构,2010,40(10):11-14.

- [11] 金林飞. 屈曲约束支撑的试验研究和理论分析[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2008.
- [12] 李国强, 孙飞飞, 邓仲良, 等. 屈曲约束支撑抗震试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(18): 71-78.

## Contrastive Analysis of BRB's Mechanical Models

ZHOU Xiaolin, LEI Jinsong

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** There are two main mechanical models for the analysis of Buckling Restrained Brace (BRB): smooth and nonlinear Bonc-Wen model and Bilinear kinematic hardening model (BKIN). For contrastive analysis of the difference of simulating BRB in the structure between these two kinds of models, nonlinear time-history analysis had been made according to test model. According to the construction features of BRB, the BRB's mechanics formula was constructed based on series stiffness model. As the stiffness of ordinary connections region is usually enough large, mechanical model can be simplified by assuming that the stiffness of connecting piece is infinite. Meanwhile, by adopting super-strength coefficient support yield force can be amended to embody the function of support core materials strength increasing. An experimental model, based on 2-stories single span herringbone BRB steel frame, use SAP2000 finite element software and respectively build Bonc-Wen and bilinear kinematic hardening model. Furthermore, nonlinear dynamic time-history analysis is conducted. Their peak acceleration, inter-story displacement and response of story drift are obtained by analysis. Then compared with test data, the results indicate that these two model's difference is not obvious generally. However, the Bonc-Wen model of yield stiffness smooth transition approaches the test data further than BKIN model on simulating BRB.

**Key words:** BRB (Buckling Restrained Brace); Bonc-Wen; bilinear; nonlinear time-history