

文章编号: 1000-4750(2018)07-0039-08

具有复位功能的阻尼耗能支撑滞回模型与抗震性能研究

徐龙河¹, 王坤鹏¹, 谢行思¹, 李忠献²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 在传统磁流体阻尼器基础上提出了一种具有复位功能的阻尼耗能支撑, 对传统 Bouc-Wen 模型进行了改进, 建立了适用于阻尼耗能支撑的恢复力计算模型, 并在 Simulink 环境下对改进的双 Bouc-Wen 模型进行仿真分析, 将仿真结果与支撑有限元模拟分析结果进行了对比; 基于 OpenSees 平台, 对改进的双 Bouc-Wen 模型进行二次开发, 并对采用具有复位功能的阻尼耗能支撑和普通防屈曲支撑的 9 层 Benchmark 钢框架结构模型进行了抗震性能对比分析。结果表明, 双 Bouc-Wen 模型仿真得到的滞回曲线与有限元模拟得出的滞回曲线吻合较好, 可以很好地描述阻尼支撑旗形滞回特性, 具有复位功能的阻尼支撑可有效减小钢结构的最大层间位移及震后残余变形, 阻尼耗能支撑结构具备良好的可恢复性。

关键词: 自复位性能; Bouc-Wen 模型; 滞回特性; 抗震性能; 残余变形

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.03.0204

STUDY ON HYSTERETIC MODEL AND SEISMIC PERFORMANCE OF DAMPING ENERGY DISSIPATION BRACE WITH SELF-CENTERING CAPABILITY

XU Long-he¹, WANG Kun-peng¹, XIE Xing-si¹, LI Zhong-xian²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: On the basis of a traditional magnetorheological (MR) damper, a novel damping energy dissipation brace with self-centering capability is developed. A restoring force calculation model, the improved double Bouc-Wen model, is established to portray the hysteretic behaviors of the damping energy dissipation brace by improving the traditional Bouc-Wen model, which is simulated in Simulink environment, and the simulation results are compared with the finite element analysis results. The secondary development program of the improved double Bouc-Wen model is carried out based on OpenSees platform, and using a 9-story benchmark steel frame structure as a numerical example, the comparisons of the seismic performances between a structure with the damping energy dissipation braces and a structure with buckling restrained braces (BRBs) are conducted. The hysteretic curves obtained from the double Bouc-Wen model agree well with those obtained from the finite element simulation, and the flag-shaped hysteretic behaviors of the brace can be accurately portrayed by the proposed improved double Bouc-Wen model. The maximum interstory drift and residual deformation of a steel

收稿日期: 2017-03-15; 修改日期: 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578058); 北京市自然科学基金项目(8172038)

通讯作者: 徐龙河(1976—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震与健康监测研究(E-mail: lhxu@bjtu.edu.cn).

作者简介: 王坤鹏(1989—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事结构抗震研究(E-mail: 14121097@bjtu.edu.cn);

谢行思(1992—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事结构抗震研究(E-mail: 15125896@bjtu.edu.cn);

李忠献(1961—), 男, 安徽人, 长江学者特聘教授, 博士, 博导, 从事工程结构抗震抗爆、减灾控制与健康监测研究(E-mail: zxl@tju.edu.cn).

frame structure after earthquakes are effectively reduced, so that the structure with damping energy dissipation brace exhibits a good recovery performance.

Key words: self-centering performance; Bouc-Wen model; hysteretic behavior; seismic performance; residual deformation

传统支撑易受压屈曲且屈曲后承载力急剧下降、刚度退化,发生疲劳破坏。防屈曲支撑^[1-2]能有效耗散地震输入能量,并为结构提供稳定的抗侧力,然而防屈曲支撑的屈服耗能方式使得结构在震后存在一定的残余变形。为有效控制结构地震响应,减小结构震后残余变形,使得结构具有可修复功能,自复位结构减震技术研究与应用得到了迅速发展。Ma 等^[3-4]提出一种利用螺旋弹簧作为复位材料、形状记忆合金杆耗散能量的自复位阻尼器,在 Bouc-Wen 模型和双折线模型基础上建立其恢复力模型,对装有阻尼器的钢框架结构进行仿真分析,其研究表明自复位阻尼器可有效控制结构地震响应。Christopoulos 等^[5]、Tremblay 等^[6]提出了一种利用预应力筋提供复位力、通过摩擦耗能的自恢复耗能支撑,建立了对应于每个受力阶段的支撑恢复力模型,并对支撑框架结构进行动力分析,验证了自恢复结构具有良好的抗震性能。Miller 等^[7-8]提出利用形状记忆合金复位的自恢复耗能支撑,通过防屈曲支撑 (Buckling Restrained Brace, BRB) 恢复力模型和形状记忆合金超弹性模型的叠加建立了自恢复耗能支撑的恢复力模型,并利用 OpenSees 有限元软件对该支撑的恢复力模型进行数值验证,且结果吻合较好。Xu 等^[9-11]、徐龙河等^[12]提出一种利用预压碟簧提供复位力和摩擦板耗散能量的新型自恢复支撑,并利用双折线弹性模型和弹塑性滞回模型对新型自恢复支撑框架进行数值模拟,结果表明自恢复支撑结构有较好的抗震性能。

本文提出一种利用磁流变液^[13-14]的流变性能耗能、碟形弹簧提供复位力的阻尼耗能支撑,在 Bouc-Wen 模型基础上,建立了适用于描述阻尼耗能支撑滞回特性的恢复力模型,并利用 OpenSees 平台开发了其材料本构模型,对装有此支撑的钢框架进行了动力时程分析,对比了纯框架结构、BRB 结构和阻尼耗能支撑结构的抗震性能。

1 阻尼耗能支撑工作原理

1.1 工作原理

具有复位功能的阻尼耗能支撑(自复位阻尼耗

能支撑)是由基于磁流变液的耗能系统和由碟簧提供复位力的复位系统构成,构造如图 1 所示。正常情况下,支撑通过碟簧两侧端板施加的初始预压力来提供复位力,在外部激励下,内管和导向轴发生相对移动,内管上的挡块和导向轴上的螺母挤压碟簧端板来提供更大的复位力,外部激励减小或者消失时,支撑在碟簧提供的复位力作用下恢复到平衡状态。在发生相对变形的过程中,耗能系统利用活塞两端的压力差克服“固化”磁流变液的剪切屈服应力,使缸筒内一侧的磁流变液通过阻尼通道流向另一侧,从而使活塞产生阻尼力,耗散地震输入能量。

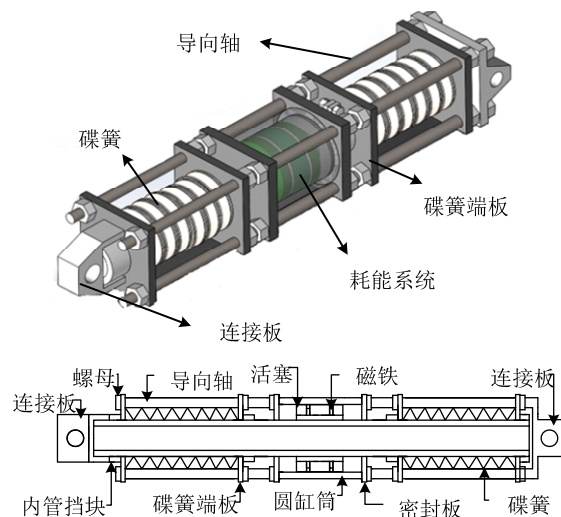
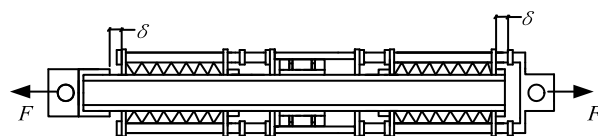


图 1 阻尼耗能支撑构造

Fig.1 Configuration of the damping energy dissipation brace

1.2 力学性能

支撑在受拉和受压作用下的变形如图2所示,支撑拉压对称,受拉下第 I 阶段属于内管和导向轴克服碟簧预压力和阻尼力的弹性变形,第 II 阶段为碟簧压缩、耗能系统耗能阶段,第 III 阶段为耗能系统阻尼力方向变化阶段,第 IV 阶段为碟簧复位、阻尼力反向耗能阶段。根据双折线模型和 Bingham 模型,分别计算阻尼耗能支撑的复位力和耗能系统的



(a) 受拉

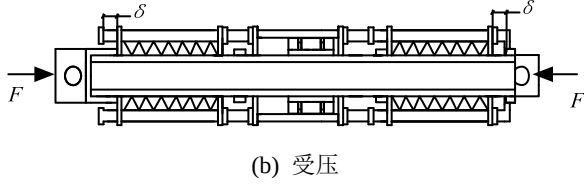


图2 阻尼耗能支撑性能

Fig.2 Behaviors of the damping energy dissipation brace

阻尼力, 各阶段的恢复力 F 与位移 $\delta(t)$ 的关系为:

$$F = \begin{cases} k_1 \delta(t), & 0 \leq \delta(t) \leq \delta_0 \text{ 且 } \delta(t) \cdot \dot{\delta}(t) \geq 0 \\ \frac{3L\tau_y}{h} A_p \operatorname{sgn}[\dot{\delta}(t)] + P_0 + k_2(\delta(t) - \delta_0), & \delta_0 \leq \delta(t) \leq \delta_{\max} \text{ 且 } \delta(t) \cdot \dot{\delta}(t) \geq 0 \\ \left(1 - 2 \frac{\delta_{\max} - \delta(t)}{\delta_0}\right) \frac{3L\tau_y}{h} A_p \operatorname{sgn}[\dot{\delta}(t)] + P_0 + k_2(\delta_{\max} - \delta_0), & \delta_{\max} - \delta_0 \leq \delta(t) \leq \delta_{\max} \text{ 且 } \delta(t) \cdot \dot{\delta}(t) \leq 0 \\ -\frac{3L\tau_y}{h} A_p \operatorname{sgn}[\dot{\delta}(t)] + P_0 + k_2 \delta(t), & 0 \leq \delta(t) \leq \delta_{\max} - \delta_0 \text{ 且 } \delta(t) \cdot \dot{\delta}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_1 为内管和导向轴串联后的刚度; k_2 为两侧碟簧并联后的刚度; L 为活塞有效长度; τ_y 为磁流变液的剪切屈服强度; h 为活塞与圆缸筒内壁的间隙宽度; A_p 为活塞与磁流变液接触的有效面积; P_0 为碟簧预压力; $\dot{\delta}(t)$ 为活塞的运动速度; δ_0 为支撑进入 II 段时内管和导向轴的相对变形; $\delta_{\max}$ 为支撑最大位移响应。

2 支撑双 Bouc-Wen 模型及仿真

2.1 阻尼耗能支撑双 Bouc-Wen 模型

图 3 为在复位系统和耗能系统共同作用下阻尼耗能支撑的滞回模型, 图中 T_f 为碟簧间的摩擦力, T_0 为磁场作用下的库仑阻尼力, T_c 为与速度有关的粘滞阻尼力。由于碟簧间存在摩擦, 复位系统的恢复力模型不是理想的双折线模型, 且在受力下其实际滞回曲线平滑圆滑^[9-12]; 耗能系统属于速度相关型出力装置, Bingham 模型不能较好地描述耗能系统的力-速度曲线^[13-14], 不能反映阻尼耗能支撑在动力荷载作用下的出力特性, 同时基于双折线模型和 Bingham 模型给出的恢复力 F 与位移 $\delta(t)$ 关系式分为多段, 增加了计算规则, 不能简洁地将多个阶段联系起来描述支撑滞回特性。

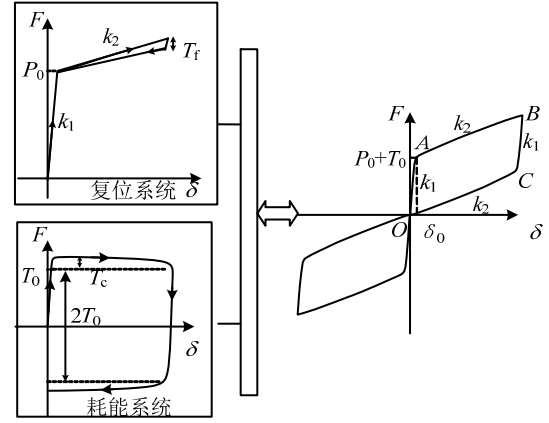


图3 阻尼耗能支撑滞回模型

Fig.3 Hysteretic model of the damping energy dissipation brace

Bouc-Wen 模型^[15-17]使用一个非线性微分方程就可以精确描述复杂的非线性滞回特性, 且通用性强、易于数值处理, 现已得到广泛应用。本文在 Bouc-Wen 模型的基础上, 基于支撑复位系统和耗能系统共同工作原理, 提出一种能描述自复位阻尼耗能支撑滞回特性的双 Bouc-Wen 模型, 如图 4 所示, 其力学模型描述为:

$$F = c_0 \dot{y}(t) + k_2 y(t) + \alpha z(t) + \rho v(t) \quad (2)$$

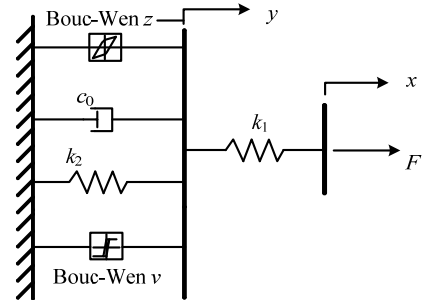


图4 自复位阻尼耗能支撑双 Bouc-Wen 模型

Fig.4 Double Bouc-Wen model of the self-centering damping energy dissipation brace

式(2)还可以表示为:

$$F = k_1(x - y) \quad (3)$$

其中, Bouc-Wen 单元 $z(t)$ 和 $v(t)$ 分别为:

$$\dot{z}(t) = -\gamma_1 |\dot{x}(t)| z(t) |z(t)|^{n-1} - \beta_1 \dot{x}(t) \cdot |z(t)|^n + A_1 \dot{x}(t) \quad (4)$$

$$\dot{v}(t) = -\gamma_2 |\dot{x}(t)| v(t) |v(t)| + A_2 \dot{x}(t) \cdot \operatorname{sign}(x\dot{x}) - \beta_2 \dot{x}(t) \cdot \operatorname{sign}(x\dot{x}) \cdot |v(t)|^2 \quad (5)$$

式(3)代入式(2)可得:

$$\dot{y}(t) = \frac{1}{c_0} [k_1(x - y) - k_2 y(t) - \alpha z_1(t) - \rho v(t)] \quad (6)$$

式中: c_0 为阻尼支撑的材料粘滞系数; α 为支撑阻尼力系数; ρ 为残余变形控制参数; x 为支撑端部加

载位移; y 为支撑的一个内位移变量; γ_1 、 β_1 、 A_1 、 n 为滞回变量 $z(t)$ 的形状控制参数; γ_2 、 β_2 、 A_2 为滞回变量 $v(t)$ 的形状控制参数。

由式(2)~式(6)可知, 双 Bouc-Wen 模型中与耗能系统有关的滞回变量 z 有 4 个参数, 与复位系统有关的滞回变量 v 有 3 个参数, 这 7 个参数与内管和导向轴的刚度相关。 α 和 ρ 可分别取库仑阻尼力和碟簧预压力的大小。

2.2 模型 Simulink 仿真

在 Simulink 环境下对双 Bouc-Wen 模型进行设计和仿真分析, 其实现过程如图 5 所示。在相同的加载条件下, 将支撑双 Bouc-Wen 模型仿真结果与实体单元有限元分析结果对比。实体单元有限元分析采用 ANSYS 中 SOLID45 模拟支撑内管、导向轴、挡板、活塞等, COMBIN14 模拟碟簧, 接触单元为 CONTA174、TARGE170, 图 6 为阻尼耗能支撑有限元模型。图 7 为双 Bouc-Wen 模型参数 α 取 200 kN, ρ 分别取 150 kN、200 kN、250 kN 时, 在频率为 0.25 Hz、振幅分别为 10 mm、20 mm、30 mm 正弦

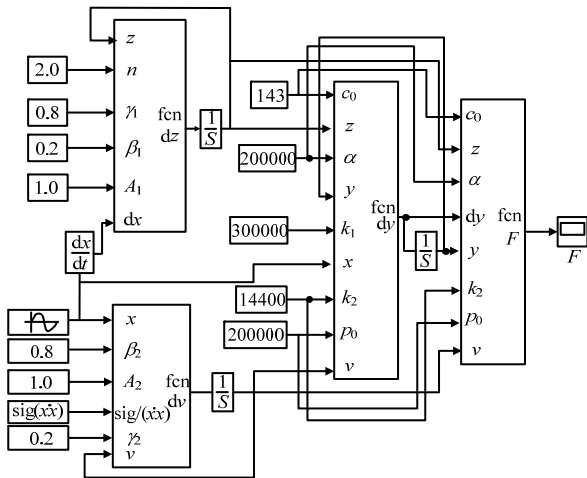


图 5 双 Bouc-Wen 模型在 Simulink 中实现

Fig.5 Realization of the double Bouc-Wen model in Simulink

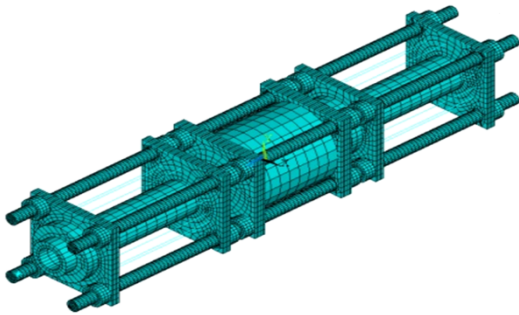
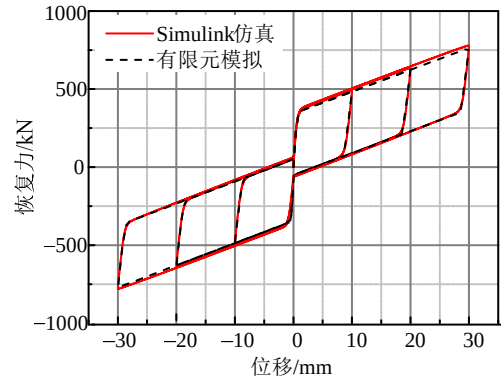
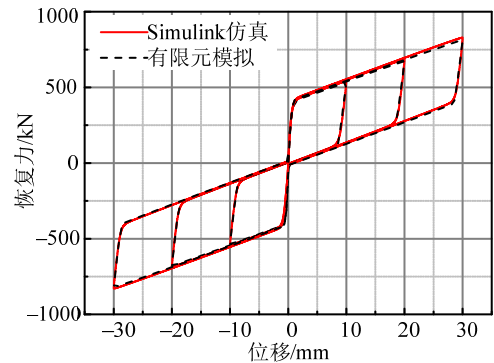


图 6 阻尼耗能支撑有限元模型

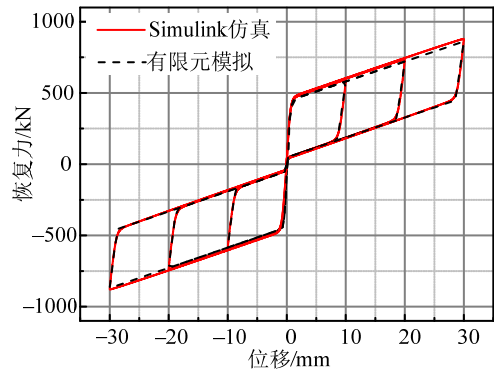
Fig.6 Finite element model of the damping energy dissipation brace



(a) ρ 小于 α



(b) ρ 等于 α



(c) ρ 大于 α

图 7 支撑双 Bouc-Wen 模型仿真与有限元模拟滞回曲线对比

Fig.7 Comparisons of hysteretic curves of double Bouc-Wen model and finite element simulation of braces

激励下, 双 Bouc-Wen 模型 Simulink 仿真得到的滞回曲线与 ANSYS 有限元模拟的滞回曲线对比结果。

由图 7 可知, ρ 小于 α 时, 支撑残余变形为 4.6 mm, 是阻尼器发生的最大位移的 14.6%; ρ 等于 α 时, 支撑基本没有残余变形; ρ 大于 α 时, 支撑具有较强的复位能力, 恢复到原点附近时, 还存有 50 kN 左右的复位力。

在频率为 0.25 Hz、振幅分别为 10 mm、20 mm、30 mm 正弦激励下, 支撑双 Bouc-Wen 模型 Simulink 仿真与有限元模拟得到的最大恢复力和耗能的最大相对误差见表 1。由图 7 和表 1 可知, 双 Bouc-Wen

模型仿真得到的滞回曲线拐角处平滑圆润,最大恢复力 Simulink 仿真值与有限元模拟值的最大相对误差为 2.2%,耗能 Simulink 仿真值与有限元模拟值的最大相对误差为 5.7%,可见 Simulink 仿真结果与有限元模拟结果吻合较好,表明所建立的支撑双 Bouc-Wen 模型可以精确描述自复位阻尼耗能支撑的滞回特性。

表 1 Simulink 仿真与有限元模拟结果的最大相对误差

Table 1 Maximum relative errors between results of Simulink simulation and finite element simulation

设计条件	振幅/mm	与有限元模拟相比最大误差/(%)	
		最大恢复力	耗能
$p < \alpha$	10	1.80	2.11
	20	2.02	4.20
	30	2.10	5.65
$p = \alpha$	10	1.78	0.05
	20	1.90	0.55
	30	1.60	1.43
$p > \alpha$	10	1.78	1.42
	20	2.20	3.60
	30	2.10	5.70

3 双 Bouc-Wen 模型二次开发及应用

3.1 双 Bouc-Wen 模型开发

目前有限元软件中没有满足自复位阻尼耗能支撑这种特殊旗形滞回特性的材料本构模型,为此,本文在 OpenSees 平台上开发了支撑双 Bouc-Wen 模型的材料本构模型,命名为 SCDB,利用 OpenSees 强大的非线性分析功能,完成自复位支撑结构静力弹塑性分析、动力弹塑性时程分析。

在频率为 0.25 Hz、振幅分别为 10 mm、20 mm、30 mm 正弦激励下,开发的 SCDB 材料本构对自复位阻尼耗能支撑的有限元模拟与支撑双 Bouc-Wen 模型仿真结果对比如图 8,可见 SCDB 材料本构可以精确模拟分析自复位阻尼耗能支撑的滞回特性。

3.2 Benchmark 有限元模型建立

选取 9 层 Benchmark 钢框架进行动力时程分析,结构立面图如图 9 所示。结构平面尺寸为 45.75 m×45.75 m,总高为 40.82 m,南北方向 5 跨,东西方向 5 跨,跨度均为 9.15 m。该结构有一层地下室,层高为 3.65 m,首层层高 5.49 m,其余各层层高均为 3.96 m;梁、柱均为 W 型钢,屈服强度分别为 248 MPa 和 345 MPa。在原有框架结构的基础上,在结构东西方向的第 2 榀、3 榀、4 榀、5 榀的第 2 跨、第 4 跨通高布置倒 V 形支撑,支撑与框

架采用铰接连接。

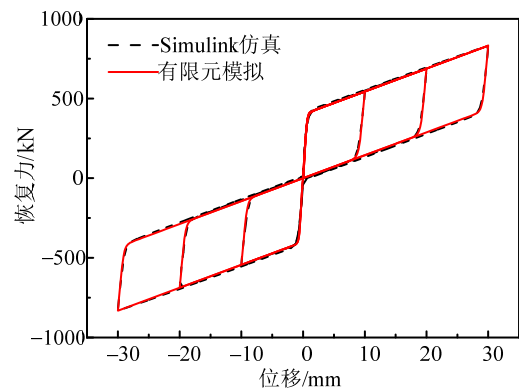


图 8 支撑双 Bouc-Wen 模型二次开发与 Simulink 仿真对比
Fig.8 Comparison of secondary development simulation and Simulink simulation of double Bouc-Wen model of the brace

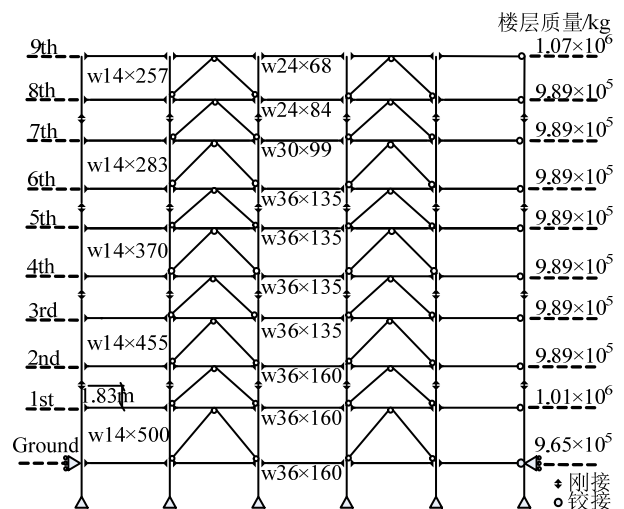


图 9 钢框架结构立面图

Fig.9 Elevation of steel frame structure

钢框架结构的梁柱采用梁单元模拟,板采用壳单元模拟,支撑采用杆单元模拟,设置 BRB 支撑和阻尼耗能支撑两种类型,按照相同屈服力和屈服位移的原则设计,即进入第 II 阶段时的支撑恢复力和位移相同,分别为 400 kN 和 1.5 mm。框架梁柱和 BRB 支撑的钢材本构采用修正的 Menegotto-Pinto 模型,阻尼耗能支撑的材料本构采用新开发的 SCDB 模型。

3.3 结构响应分析

为验证开发模型的正确性,本文按《抗规》中“平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符”的要求,根据需求在(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)上选取 5 条典型地震波,如表 2 所示,将地震波地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)按 0.6 g 进行调幅,对两种支撑

框架结构和普通结构在 PGA 为 0.6 g 的地震波作用下进行动力时程分析，自复位阻尼耗能支撑第 II 阶段刚度 k_2 为 14.4 kN/mm。

图 10 为两种支撑框架与纯框架在不同地震作用下最大层间位移角分布图。在前 4 条地震波下自复位阻尼耗能支撑框架最大层间位移角均小于 BRB 框架，最后一条地震波下阻尼耗能支撑结构最大层间位移角略大于 BRB 结构，与纯框架相比，两种支撑结构均减小了最大层间位移角。在 5 条地震波作用下，阻尼耗能支撑结构最大层间位移角均值为 1.15%，比 BRB 框架最大层间位移角均值减小 11.54%，比纯框架最大层间位移角均值减小 53.3%，可见阻尼耗能支撑结构可以有效控制结构的最大层间位移角，减小地震作用对结构的损害。

表 2 输入地震动信息

Table 2 Information of the input ground motions

编号	事件	年份	站台	方向
1	Northridge-01	1994	Wadsworth VA Hospital	FN
2	Kem County	1952	Taft Linco In School	FN
3	Kobe Japan	1995	Shin-Osaka	FP
4	Chi-Chi-03	1999	TCU082	FP
5	Loma Prieta	1989	Hollister Differential Array	FN

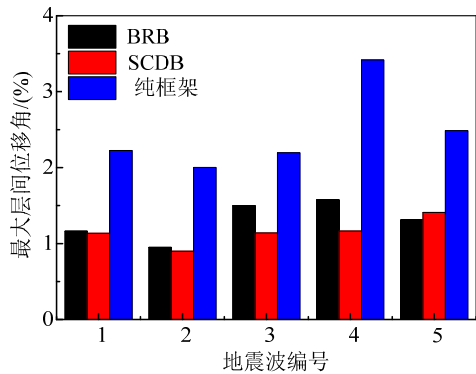


图 10 PGA 为 0.6 g 时不同地震波作用下结构最大层间位移角
Fig.10 Maximum interstory drift of structures under different earthquakes with PGA of 0.6 g

图 11 为两种支撑框架和纯框架结构在 5 条地震波作用下各层最大层间位移角均值分布曲线。可看出，纯框架底层和 6 层的层间位移角最大，易形成薄弱层，阻尼耗能支撑框架有效减小了各层的层间位移角，使层间位移角分布更为均匀，有效抑制薄弱层的形成。自复位阻尼耗能支撑框架与 BRB 框架和纯框架相比，各层平均最大层间位移角均有所减小，可更好地保护构件安全。

结构在强烈地震作用下产生的过大侧向变形及残余变形往往是导致结构破坏的主要原因。图 12

为两种支撑框架和纯框架结构在 5 条地震波作用下最大层间残余变形分布图。从图中看出，纯框架支撑有较大的残余变形，在地震波 4 作用下纯框架结构的最大残余变形为 35.5 mm，BRB 框架与自复位阻尼耗能支撑框架均减小了残余变形，自复位阻尼耗能支撑框架的残余变形非常小，与纯框架相比，其最大层间残余变形减小 95%以上，与 BRB 框架相比，其最大层间残余变形减小 85%以上，说明在强震作用下，自复位阻尼耗能支撑能够有效减小甚至消除结构的残余变形。

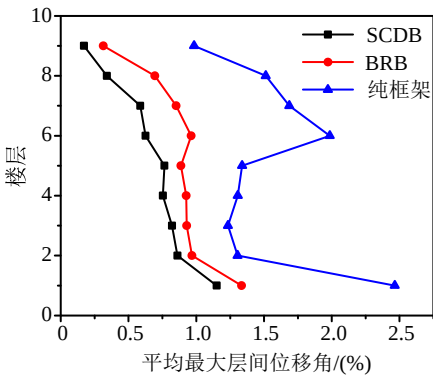


图 11 5 条地震波作用下结构最大层间位移角均值变化曲线
Fig.11 Average value variation curves of maximum interstory drift of structures under 5 earthquakes

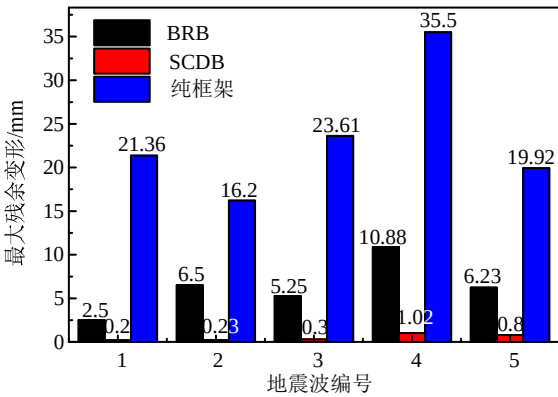


图 12 PGA 为 0.6 g 时不同地震波作用下结构最大残余变形
Fig.12 Maximum residual deformation of structures under different earthquakes with PGA of 0.6 g

由于 BRB 支撑和阻尼耗能支撑对结构附加刚度的影响，两种支撑框架结构的前三阶振型周期较纯框架结构的前三阶振型周期明显减小，如表 3 所示。图 13 为 5 条地震波作用下两种支撑框架和纯框架的楼层最大加速度均值变化曲线。由图可知，与 BRB 框架相比，自复位阻尼耗能支撑结构的薄弱层(底层)层加速度均值没有放大，3 层以上层最大加速度均值放大了 8.5%；与纯框架结构相比，自复位阻尼耗能支撑框架各层层加速度均有所放大，其

中结构的 7 层、8 层、9 层层加速度均值放大程度最大, 相比放大了 25.7%, 但由于这 3 层的层间位移响应较小, 加速度放大对结构影响较小, 而薄弱层(底层)层加速度均值放大较小, 约为 6.6%。

表 3 不同结构自振特性

Table 3 Natural vibration properties of different structures

	第 1 自振周期/s	第 2 自振周期/s	第 3 自振周期/s
纯框架结构	1.52	1.26	1.23
BRB 结构	1.26	1.10	0.93
SCDB 结构	1.26	1.10	0.93

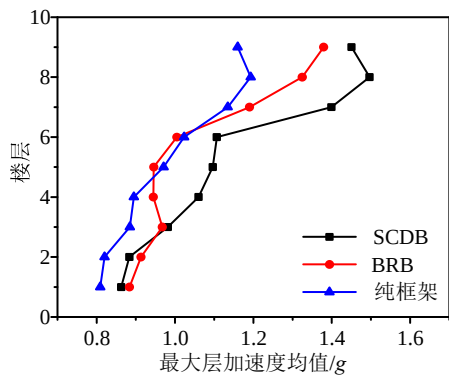


图 13 5 条地震波作用下最大层加速度的平均值变化曲线
Fig.13 Average value variation curves of maximum story accelerations under 5 earthquakes

纯框架结构在地震波 4 的作用下响应最大, 因此提取两种支撑框架和纯框架结构在地震波 4 下最大层间位移时程曲线, 如图 14 所示。由图可以看出纯框架结构震后存在明显的残余变形, 梁、柱发生塑性变形, 层间位移时程曲线在地震后期偏离平衡位置, 不能恢复到正常状态; BRB 框架的层间位移较纯框架结构减小, 但震后仍存在明显残余变形; 阻尼耗能支撑框架层间位移时程曲线始终围绕水平轴上下波动, 使得结构梁、柱在震后都能回到初始位置, 结构具备良好的可恢复性。

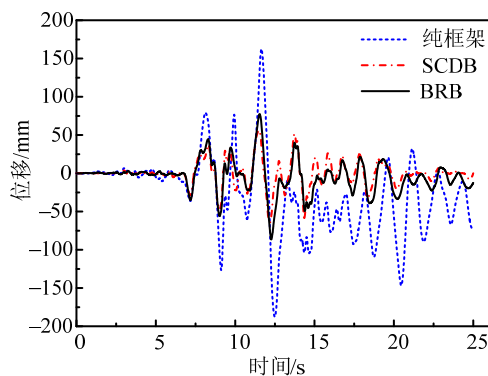
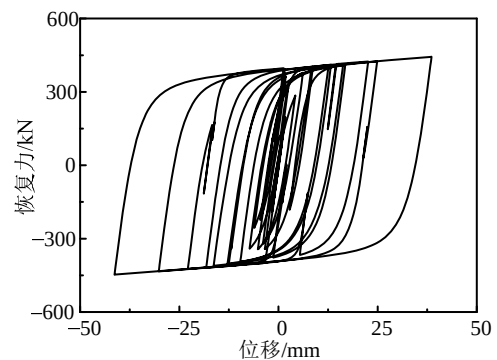
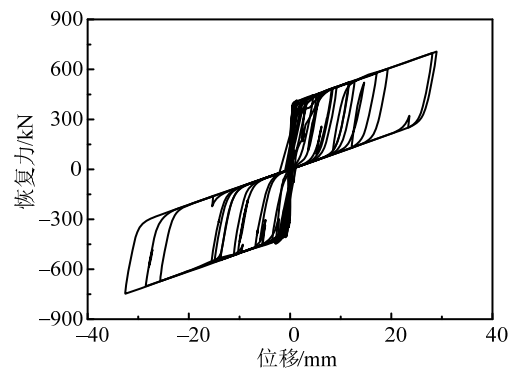


图 14 Chi-Chi 波作用下最大层间位移时程曲线
Fig.14 History curves of maximum interstory drifts of structures due to Chi-Chi earthquake

图 15 为地震波 4 作用下的两种支撑框架二层支撑的滞回曲线。由图 15(a)可知, BRB 在屈服后产生较大的塑性变形, 荷载消失后不会复位到初始位置, 存在较大的残余变形; 由图 15(b)可知, 二次开发的双 Bouc-Wen 模型可精确描述自复位阻尼耗能支撑的滞回特性, 阻尼耗能支撑虽然在地震过程中有较大的变形, 但地震作用消失后仍能够回到初始位置, 有效减小结构残余变形。与 BRB 相比, 自复位阻尼耗能支撑在碟簧作用下, 进入第 II 阶段后仍有较大的刚度, 可以明显提高支撑的承载力。由于阻尼耗能支撑滞回曲线各阶段刚度转换较剧烈, 对整体结构层加速度有影响, 有待进一步研究。



(a) BRB 滞回曲线



(b) 阻尼耗能支撑滞回曲线

图 15 BRB 和阻尼耗能支撑的滞回曲线

Fig.15 Hysteretic curves of BRB and the damping energy dissipation brace

4 结论

本文提出了一种具有复位功能的阻尼耗能支撑, 对其工作原理及力学性能进行了介绍, 建立了适合自复位阻尼耗能支撑的双 Bouc-Wen 模型并对其进行了仿真分析, 对所建立的恢复力模型基于 OpenSees 平台进行二次开发, 采用 OpenSees 有限元软件对 BRB 框架和阻尼耗能支撑框架进行响应分析, 得到如下结论:

(1) 所建立的支撑双 Bouc-Wen 模型与有限元数值模拟吻合较好, 最大误差在 6% 内, 可以准确描述自复位阻尼耗能支撑的滞回特性。

(2) 与 BRB 框架相比, 阻尼耗能支撑框架的最大层间位移角均值减小 11.54%, 同纯框架相比, 其最大层间位移角均值减小 53.3%, 说明自复位阻尼耗能支撑可以有效控制框架结构的最大层间位移角, 其控制效果略优于 BRB 框架。

(3) 自复位阻尼耗能支撑框架的最大层间残余变形比纯框架减少 95% 以上、比 BRB 框架减少 85% 以上, 可见自复位阻尼耗能支撑可以减小甚至消除结构残余变形, 使结构具有良好的可恢复性。

(4) 与 BRB 框架和纯框架相比, 阻尼耗能支撑框架的最大层加速度均值分别放大 8.5%、25.7%, 结构薄弱层底层加速度放大较小, 比纯框架结构放大 6.6%。

参考文献:

- [1] Asgarian B, Amirhesari N. A comparison of dynamic nonlinear behavior of ordinary and buckling restrained braced frames subjected to strong ground motion [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2008, 17(2): 367—386.
- [2] 周云, 钱洪涛, 褚洪民, 等. 新型防屈曲耗能支撑设计原理与性能研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(4): 64—71.
Zhou Yun, Qian Hongtao, Chu Hongmin, et al. A study on the design principle and performance of a new type of buckling-restrained brace [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(4): 64—71. (in Chinese)
- [3] Ma H W, Cho C. Feasibility study on a super-elastic SMA damper with re-centering capability [J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, 473 (1-2): 290—296.
- [4] Ma H W, Michael C H Y. Modeling of a self-centering damper and its application in structural control [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(4): 656—666.
- [5] Christopoulos C, Tremblay R, Kim H J, et al. Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(1): 96—107.
- [6] Tremblay R, Lacerte M, Christopoulos C. Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2008, 134(1): 108—120.
- [7] Miller D J, Fahnestock L A, Eatherton M R. Self-centering buckling-restrained braces for advanced seismic performance [C]// *Proceedings of the 2011 Structures Congress*, Las Vegas, USA: ASCE, 2011: 960—970.
- [8] Miller D J, Fahnestock L A, Eatherton M R. Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace [J]. *Engineering Structures*, 2012, 40: 288—298.
- [9] Xu L H, Fan X W, Lu D C, et al. Hysteretic behavior studies of self-centering energy dissipation bracing system [J]. *Steel and Composite Structures*, 2016, 20(6): 1205—1219.
- [10] Xu L H, Fan X W, Lu D C, et al. Development and experimental verification of a pre-pressed spring self-centering energy dissipation brace [J]. *Engineering Structures*, 2016, 127: 49—61.
- [11] Xu L H, Fan X W, Li Z X. Cyclic behavior and failure mechanism of self-centering energy dissipation braces with pre-pressed combination disc springs [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2016, 46(7): 1065—1080.
- [12] 徐龙河, 樊晓伟, 代长顺, 等. 预压弹簧自恢复耗能支撑受力性能分析与试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(9): 142—148.
Xu Longhe, Fan Xiaowei, Dai Changshun, et al. Mechanical behavior analysis and experimental study on pre-pressed spring self-centering energy dissipation brace [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(9): 142—148. (in Chinese)
- [13] 丁阳, 张路, 姚宇飞, 等. 阻尼力双向调节磁流变阻尼器的性能测试与滞回模型[J]. *工程力学*, 2010, 27(2): 228—234.
Ding Yang, Zhang Lu, Xiao Yufei, et al. Performance test and hysteresis model of MR damper with bidirectional adjusting damping force [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(2): 228—234. (in Chinese)
- [14] 张路. 新型磁流变阻尼器及大跨度空间结构半主动控制体系研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 15—20.
Zhang Lu. New MR dampers and semi-active control system of long-span spatial structures [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 15—20. (in Chinese)
- [15] Weber F. Bouc-Wen model-based real-time force tracking scheme for MR dampers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(4): 045012.
- [16] 高向宇, 张慧, 杜海燕, 等. 防屈曲支撑恢复力的特点及计算模型研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(6): 19—28.
Gao Xiangyu, Zhang Hui, Du Haiyan, et al. Study on characterization and modeling of buckling-restrained brace [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 19—28. (in Chinese)
- [17] 吴从晓, 周云, 邓雪松. 钢铅粘弹性阻尼器试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(3): 150—155.
Wu Congxiao, Zhou Yun, Deng Xuesong. Experimental study on steel-lead viscoelastic damper [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(3): 150—155. (in Chinese)