

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.072



# 基于增量动力分析法的高层建筑-阻尼器系统 地震易损性分析

国巍<sup>1a,1b</sup>, 曾晨<sup>1a</sup>, 潘毅<sup>2</sup>, 赖炜煌<sup>3</sup>, 胡思远<sup>2</sup>

(1. 中南大学 a. 土木工程学院; b. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 100191; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**高层建筑在远场强地震下可能发生严重震害, 通常在建筑中设置阻尼器实现消能减震, 降低建筑物主体结构地震响应以减轻震致破坏。现行建筑抗震设计规范已经给出了建筑中阻尼器的通用设计方法, 然而, 建筑-阻尼器系统在强地震下的实际响应是否与设计结果有所偏差、在同一设防目标下不同类型阻尼器的性能是否存在差异尚不清楚。基于现行建筑抗震设计规范, 设计了 20 层钢框架结构以作为阻尼器性能评估的 Benchmark 模型, 并以同一减震目标设计了 3 类典型阻尼器: 摩擦阻尼器、粘滞阻尼器和防屈曲支撑, 基于所拟合的阻尼器试验曲线, 对阻尼器进行参数设计, 给出了典型阻尼器的数值模型。基于场地类型选取了 10 条地震动进行增量动力分析, 对比评估了 3 类典型阻尼器对结构抗倒塌性能的控制效果。采用基于位移的结构性能水准评价指标, 研究了 3 类典型阻尼器的减震控制效果, 结果表明, 对于采用基于中国规范设计的高层建筑-阻尼器系统, 速度型的粘滞阻尼器控制效果最优, 位移型的摩擦阻尼器和防屈曲支撑次之, 且性能相近。

**关键词:** 框架结构; 阻尼器; 远场地震动; 增量动力分析; 地震易损性

中图分类号: TU973 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)04-0059-10

## IDA based seismic fragility analysis of high-rise building-damper system

Guo Wei<sup>1a,1b</sup>, Zeng Chen<sup>1a</sup>, Pan Yi<sup>2</sup>, Lai Weihuang<sup>3</sup>, Hu Siyuan<sup>2</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. National Engineering Laboratory of High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 100191, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** High-rise building may experience severe damage under far field strong earthquake. A common measure to reduce the seismic damage is using dampers which can mitigate the response of the structure. Current seismic design code has already been implemented with a general damper design method. However,

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0802205); 长江学者和创新团队发展计划 (IRT1296); 湖南省青年骨干教师项目 (150220077)

作者简介: 国巍(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事复杂结构体系抗震设防与试验技术研究, E-mail: guowei@csu.edu.cn。

潘毅(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn。

Received: 2018-09-25

**Foundation item:** National Key R & D Program of China (No. 2016YFC0802205); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No. IRT1296); Foundation for Key Youth Scholars in Hunan Province (No. 150220077)

**Author brief:** Guo Wei (1982-), associate professor, PhD, main research interests: seismic fortification of complex structural system and its experimental research, E-mail: guowei@csu.edu.cn.

Pan Yi (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

whether the actual seismic response of the building deviates from the design, and whether the performance of different dampers under the same seismic precaution is different, are still unknown. In this study, firstly, a 20-story steel frame structure based on current seismic design code is established as the Benchmark model, and three different types of typical dampers, including friction damper, viscous damper and buckling-restrained brace are designed under the same control target. Numerical models of the three types of dampers are established according to the fitting of damper experiment curves. Based on the site types, ten ground motions have been selected for incremental dynamic analysis, and the control effect of the structural collapse resistance of the three types of typical dampers were compared. In the meantime, displacement-based structural seismic performance level is taken as the evaluation indicator to compare the control effect of three types of typical dampers, respectively. The results show that for the high-rise building-damper system designed according to the Chinese code, the viscous damper performs the best, followed by friction damper and buckling-restrained brace.

**Keywords:** steel frame structure; damper; far field earthquake; IDA analysis; seismic fragility

大部分震级较小的远场地震动给结构带来的工程损害并不严重,但在震级较大时,远场地震动中的短周期成分将会迅速衰减,长周期成分被场地软土层放大,使得地震动的周期更加接近地表上高层建筑的自振周期,结构产生较大的动力响应。通常可在建筑结构中设置阻尼器进行消能减震,应用在结构中的典型阻尼器包括摩擦阻尼器、粘滞阻尼器和防屈曲支撑。目前,中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)对于消能减震设计已有相关规定,速度相关型阻尼器以及位移相关型阻尼器是其中重点研究的技术。

摩擦阻尼器具有耗能能力强、摩擦机构简单、取材容易、造价低廉、荷载及频谱特征对其性能影响较小的特点<sup>[1]</sup>。粘滞阻尼器利用平板或活塞在具有高度粘性的液体中运动耗能的原理实现消能减震<sup>[2-3]</sup>。防屈曲支撑具有稳定的滞回性能和耗能能力,设置在建筑主体结构中以形成减震体系<sup>[4-6]</sup>。增量动力分析方法(Incremental Dynamic Analysis, IDA)是结构抗倒塌分析的主要方法,学者们利用该方法研究发现,与传统抗弯框架和设置防屈曲支撑的结构相比,设置粘滞阻尼器能提供更好的抗倒塌性能<sup>[7]</sup>,并评估了将金属摩擦阻尼器应用于钢筋混凝土结构中结构在强地震下达到各个损伤状态的概率<sup>[8]</sup>。

目前,基于规范设计的建筑-阻尼器系统在强地震下的实际响应是否与设计结果存在偏差、在同一设防目标下不同类型阻尼器的性能是否存在差异尚不清楚。笔者基于规范建立了20层钢框架Benchmark模型,并考虑设置3种典型阻尼器——摩擦阻尼器、粘滞阻尼器和防屈曲支撑,选取远场强地震动进行IDA分析,研究结构在设置不同阻尼器

时的地震易损性,对比分析不同阻尼器的性能,研究了远场地震动对高层建筑结构抗震性能的影响。

## 1 基于规范设计的 Benchmark 模型

美国土木工程师学会(ASCE)提出了基于美国规范建立的Benchmark模型<sup>[9]</sup>,使学者能够基于一致的结构模型进行振动控制方法及新型减隔震装置研究。中美两国现行抗震设计规范存在较大差异,对于地震区划的划分、场地类别的划分、地震作用参数取值以及地震作用计算准则的处理方式不同,需要一定程度的统一后才能进行地震作用的比较和分析<sup>[10]</sup>。两国规范在钢材以及混凝土的品种、强度取值不同,不能简单类比<sup>[11]</sup>,两国规范的设计反应谱具有相同的基本特征,但在反应谱最大值、周期范围等方面存在差异<sup>[12]</sup>,中国规范在考虑地震作用的荷载组合、刚度限值、剪重比限值等方面要比美国规范更加严格<sup>[13]</sup>。由于两国规范的差异,不能简单地对现有Benchmark模型进行消能减震设计,为了能够在中国现行抗震规范下进行高层建筑中典型阻尼器性能的评估分析,需要建立基于中国规范设计的Benchmark模型。

### 1.1 工程概述

选择一座20层钢框架结构,所在地为陕西省宝鸡市,抗震设防烈度为7度,地震分组为第2组,场地类型为二类场地,设计地震基本加速度为0.15g,钢结构抗震等级为3级<sup>[14]</sup>。先用PKPM软件进行该结构的设计和布置,结果见图1(a)。

主体结构为钢框架结构,平面长宽为39.6 m×33 m,长宽比为1.2,符合长宽比不超过4的限值。底层高度为4.2 m,其余各层均为3.3 m,总高度为

66.9 m,最大高宽比为 2.07,小于高宽比不超过 6.5 的限值。结构设计遵循对称的思路,有效地减少扭转和平动相互之间的耦联,使周期比得到一定降低。建筑平面纵向共 6 榀,每一榀 6 跨,横向共 7 榀,每一榀 5 跨。

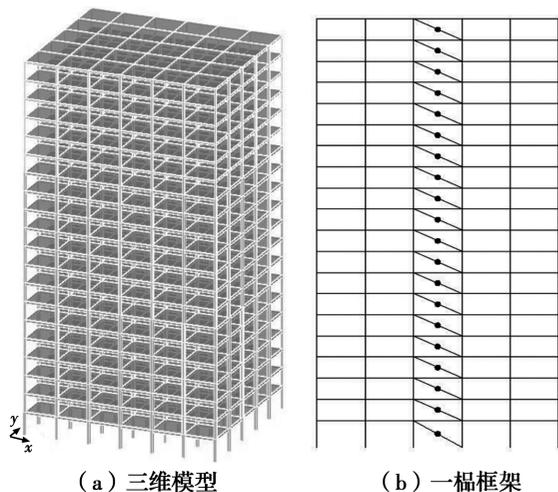


图 1 钢框架结构示意图

Fig. 1 Schematic of the steel frame structure

## 1.2 结构基本信息

所有梁柱构件都采用 Q345 钢。主梁采用窄翼缘 H 型钢,柱采用方型钢,各层梁、柱的尺寸详见表 1。各楼层的楼板采用现浇混凝土楼板,厚度统一取为 120 mm,并定义了 5 个标准层,分别为底层、2~7 层、8~14 层、15~19 层以及顶层,各楼层楼板采用刚性楼板假定。根据自行设计的梁柱布置情况,在各标准层布设梁柱构件。

表 1 各楼层主要构件规格

Table 1 Specifications for each floor mm

楼层	主梁	柱
第 1 层	HN500×200×10×16	□650×650×30×30
第 2~7 层	HN500×200×10×16	□600×600×20×20
第 8~14 层	HN400×200×8×13	□500×500×15×15
第 15~20 层	HN400×200×8×13	□400×400×15×15

## 1.3 荷载标准值的确定

楼面恒载的确定:假设每一层的楼面恒载均一致,参考汉森写字楼框架结构的设计标准<sup>[15]</sup>:10 mm 厚混合砂浆抹灰取 0.17 kN/m<sup>2</sup>,20 mm 厚水泥砂浆找平取 0.40 kN/m<sup>2</sup>,120 mm 厚现浇混凝土楼板取 3 kN/m<sup>2</sup>,某耐磨型的地板砖取 1 kN/m<sup>2</sup>,吊顶取 0.4 kN/m<sup>2</sup>,合计为 4.97 kN/m<sup>2</sup>。

楼面活载的确定:对于民用建筑的楼面均布活载规定的取值<sup>[16]</sup>,选用写字楼的活载标准值

为 2.0 kN/m<sup>2</sup>。

梁间线荷载的确定:梁间线荷载包括内外隔墙和女儿墙的自重。内墙:两侧 20 mm 厚混合砂浆抹灰,300 mm 厚蒸压粉煤灰加气砼砌块,取 7 kN/m;外墙:两侧 20 mm 厚混合砂浆抹灰,200 mm 厚蒸压粉煤灰加气砼砌块,取 5.5 kN/m;女儿墙:顶层最外侧梁承受女儿墙的线荷载,取标准值 2.0 kN/m。

## 1.4 计算结果

根据 PKPM 的建模电算结果,可以得到结构各楼层的基本信息,见表 2,为后续有限元建模提供了参数。

表 2 楼层质量  
Table 2 Seismic mass

楼层	质量/10 <sup>5</sup> kg
第 1 层	9.27
第 2~7 层	8.75
第 8~14 层	8.56
第 15~19 层	8.39
第 20 层	7.08

对钢框架结构在多遇地震下的抗震变形进行验算,高层钢框架的弹性层间位移角限值为 1/250<sup>[14]</sup>。结果见表 3。Y 方向的刚度较低,Y 方向的顶点位移和层间位移角较 X 方向大,两个方向的最大层间位移角均小于 1/250 的限值,且与限值相差不是太大,钢框架结构刚度合理。

表 3 水平地震力作用

Table 3 Horizontal earthquake effect

顶点位移/mm		最大层间位移角		最大层间位移角发生楼层
X	Y	X	Y	
125.33	129.15	1/403	1/392	8

最后,利用 OpenSees 取框架结构 Y 方向的一榀建模,如图 1(b)所示,凝练 Benchmark 模型以进行地震易损性分析,根据模态分析结果,如表 4 所示,OpenSees 中建立的结构模型与 PKPM 中建立的模型拟合度很高,体现了原结构的特点,可进行后续分析。

表 4 模态分析对比

Table 4 Comparison of modal analysis

模态	OpenSees 周期/s	PKPM 周期/s	绝对误差/s	相对误差/%
1	3.58	3.61	0.03	0.84
2	1.26	1.33	0.07	5.56
3	0.73	0.76	0.03	4.11

## 2 阻尼器参数设计

### 2.1 结构减震设计目标

控制结构的位移响应是保证结构抗震性能的有效手段,即在一定水准的地震作用下,以预期的结构位移反应为设计目标,从而实现结构在地震作用下预期的性能要求。

首先确定消能减震的控制目标,即确定地震作用的降低程度,取楼层中发生层间位移角的最大值为无阻尼器结构对应响应的 76% 作为结构减震设计目标,并以此减震目标作为 3 类阻尼器共同的设计目标,在同一设计目标下评估 3 类阻尼器的减震性能。

### 2.2 阻尼器采用的模型

摩擦阻尼器、防屈曲支撑均采用 Bouc-Wen 模型, Bouc-Wen 模型是经典的位移型阻尼器滞回曲线的恢复力模型,由于精准的拟合性,常被用于各类力学模型的研究<sup>[17]</sup>,其恢复力表达式为

$$F = \alpha K \Delta u + (1 - \alpha) K z \quad (1)$$

$$\dot{z} = A \Delta \dot{u} - \beta \Delta \dot{u} |z|^n - \gamma |\Delta \dot{u}| |z| |z|^{n-1} \quad (2)$$

式中:  $F$  为阻尼力;  $\alpha$  为屈服后阻尼器的刚度比;  $K$  为阻尼器的初始刚度;  $\Delta u$  为阻尼器的位移;  $z$  为与滞回曲线有关的形状函数;  $A$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $n$  为确定滞回曲线形状的 4 类参数。

在进行摩擦阻尼器、防屈曲支撑设计时,采用拟合文献[18-19]中提供的摩擦阻尼器和防屈曲支撑的形状函数参数来对摩擦阻尼器和防屈曲支撑进行辅助设计,如图 2 所示。

粘滞阻尼器采用线性模型,线性模型为阻尼单元的形式

$$F = c \dot{u} \quad (3)$$

式中:  $F$  为阻尼力;  $c$  为阻尼系数;  $\dot{u}$  为阻尼器运动的速度。理想状态下,粘滞阻尼器的恢复力曲线为标准的椭圆形,具有滞回曲线饱满、为结构提供附加阻尼的同时不改变结构自振频率的优点。

### 2.3 附加有效刚度和附加有效阻尼比的计算

#### 1) 附加有效刚度——等价线性化方法

$$K_{\text{eff}} = F_{\text{max}} / \Delta u_{\text{max}} \quad (4)$$

式中:  $K_{\text{eff}}$  为阻尼器附加到结构的有效刚度;  $F_{\text{max}}$  为阻尼器所受的最大荷载;  $\Delta u_{\text{max}}$  为阻尼器的最大位移。

#### 2) 附加有效阻尼比——能量化方法

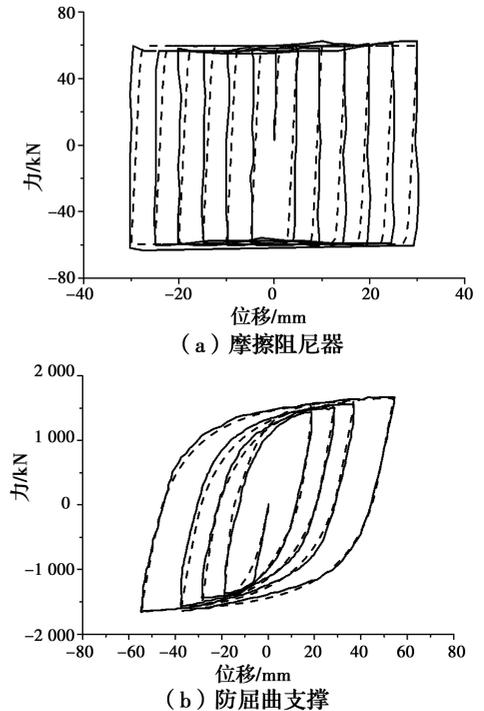


图 2 阻尼器模型曲线与试验曲线的拟合

Fig. 2 The fitting of damper model and test curve

$$\xi_d = \sum_{j=1}^n W_{c_j} / 4\pi W_s \quad (5)$$

式中:  $\xi_d$  为阻尼器附加给结构的有效阻尼比;  $W_{c_j}$  为在预计的层间位移下第  $j$  个阻尼器进行一周周期往复循环运动的耗能量;  $W_s$  为水平地震作用下消能减震结构的总应变能<sup>[19]</sup>。

### 2.4 设置阻尼器的位置

阻尼器不同的布置方式也会对阻尼器的参数设计带来影响,阻尼器的布置宜沿结构主轴方向设置,并形成均匀合理的结构体系,采用每层简单斜撑布置的形式,每层均匀布置,如图 1(b)所示。

### 2.5 阻尼器参数设计总体流程

根据已选定的阻尼器原型,确定相应滞回曲线的形状参数,之后再调整阻尼器的力学参数以满足设计要求,对附加阻尼比作出假设,并进行后续的结构变形计算,但此时计算得到结构的变形并非真实变形,需要再次采用式(5)求出阻尼器的附加阻尼比,将附加阻尼比的假定值与计算值进行比较,若二者相差很大,进行迭代计算,直到两次结果相近。阻尼器参数设计总体流程图如图 3 所示。

在这几类典型阻尼器中,除了粘滞阻尼器仅提供结构附加阻尼比之外,其他阻尼器均可以提供附加阻尼比和附加刚度。按照中国抗震设计

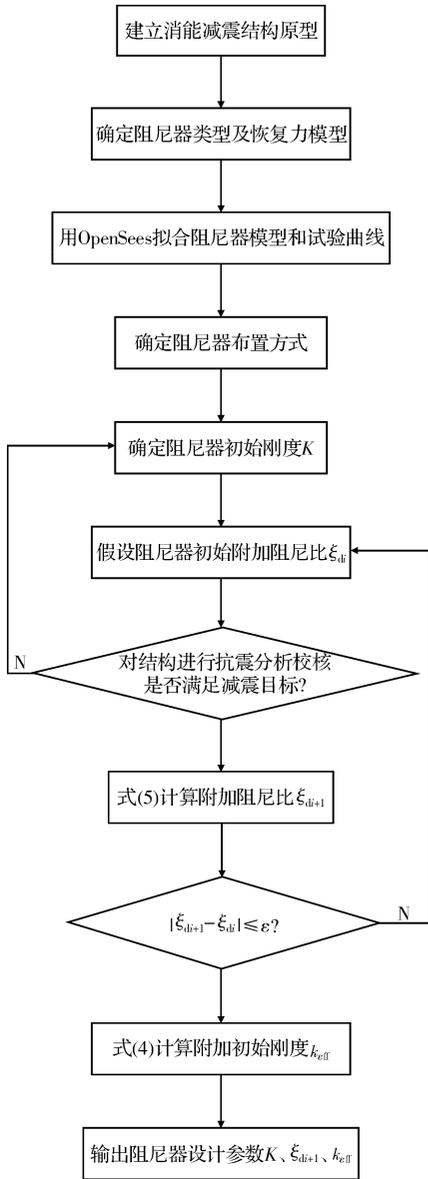


图 3 阻尼器参数设计总体流程

Fig. 3 Damper parameter design flow chart

规范的设计流程和方法,最终设计的阻尼器参数如表 5 和图 4 所示。

表 5 各类阻尼器的设计参数

Table 5 Design parameters of the dampers

阻尼器类型	滞回曲线形状参数	力学参数
摩擦阻尼器	$\alpha=0.000\ 01$	$\xi_d=0.041$ $k_{eff}=96.8\text{ kN/mm}$
	$\beta=0.91, \gamma=0.011$	
	$n=10, A=1.0$	
	$K=128\text{ kN/mm}$	
粘滞阻尼器	$C_d=11.90\text{ kNs/mm}$	$\xi_d=0.160$
	$\alpha=0.005$	$\xi_d=0.037\ 1$ $k_{eff}=99.8\text{ kN/mm}$
防屈曲支撑	$\beta=0.171, \gamma=0.3$	
	$n=0.5, A=1.0$	
	$K=156\text{ kN/mm}$	

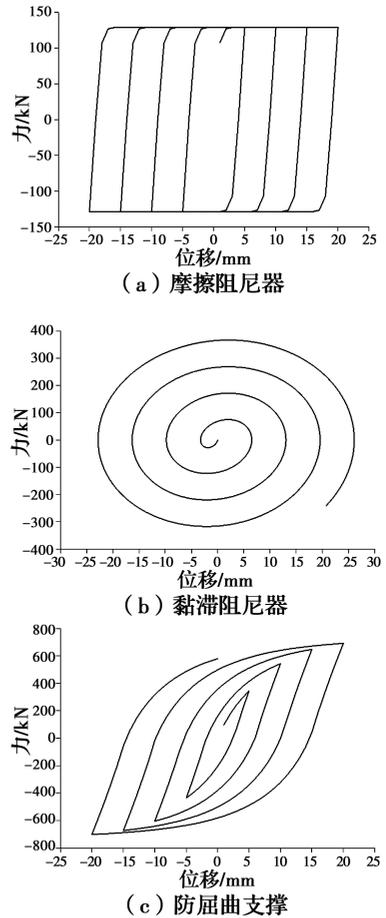


图 4 阻尼器设计结果

Fig. 4 The design result of dampers

### 3 IDA 分析基本过程

IDA 分析是将地震动的强度赋予单调递增的比例系数,得到不同强度指标度量值 IM(Intensity Measure);对结构进行动力时程分析,得到的不同强度下结构损伤指标度量值 DM(Damage Measure),从而建立反映结构响应历程的以 IM 为纵坐标、DM 为横坐标的曲线。在这一过程中,结构历经了线弹性阶段、弹塑性阶段以及破坏阶段的完整响应历程,可以全面体现地震下结构的动力响应过程。

#### 3.1 地震动的选取

文献[20]定义:小于 60 km 的断层距地震动定义为近场地震动,60~200 km 范围的断层距地震动定义为中场地震动,大于 200 km 的断层距地震动定义为远场地震动。

根据该 20 层钢框架结构的基本信息,地震影响系数最大值取 0.12,特征周期取 0.4 s,钢结构的阻尼比取 0.02,根据《建筑抗震设计规范》<sup>[14]</sup>得到场地的设计反应谱见图 5。

根据设计反应谱查找拟合度最高的地震动,相

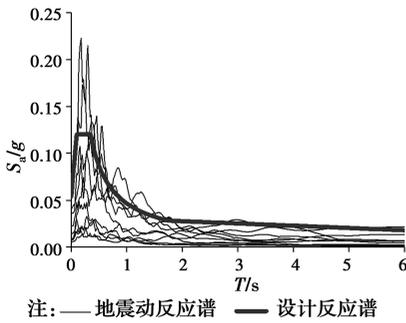


图5 地震动反应谱

Fig. 5 Response spectrum of ground motion

应的参数:矩震级为 6.5~7.8 级,震中距为 200~500 km,符合远场地震动的定义,30 m 深度土层的剪切波波速为 150~500 m/s;强震持续时间为 19~36 s,选择 10 条平行于断裂带方向的水平地震下地震动数据,其基本信息见表 6。

表 6 地震动基本信息

Table 6 Basic information of ground motion

编号	地震名	站点	矩震级
# 40	Borrego Mtn	San Onofre	6. 63
# 1812	Hector Mine	Ranger Station	7. 13
# 1830	Hector Mine	N Verdemont Sch	7. 13
# 1838	Hector Mine	Trout Farm	7. 13
# 2550	Chi-Chi_ Taiwan-03	HWA050	6. 2
# 2551	Chi-Chi_ Taiwan-03	HWA051	6. 2
# 2555	Chi-Chi_ Taiwan-03	HWA059	6. 2
# 2590	Chi-Chi_ Taiwan-03	TCU029	6. 2
# 2781	Chi-Chi_ Taiwan-03	HWA033	6. 2
# 6281	Tottori_ Japan	KYT012	6. 61

设计反应谱以及选出的 10 条地震动反应谱,如图 5 所示。

### 3.2 指标分析参数的选取

DM 指标度量是地震作用下反映结构动力响应和损伤程度的状态参数。对于框架结构,最常采用结构层间位移角的最大值  $\theta_{\max}$  作为 DM 的指标度量<sup>[21]</sup>。IM 指标度量是反映输入地震动本身强度值的参数指标,既可以用地震动运动相关参数表示,也可以用结构的最大反应相关参数表示<sup>[22]</sup>。前者常用地震动的峰值加速度 PGA,后者常用结构在第 1 阶自振周期下谱加速度  $S_a$  值表示。对于中长周期结构,PGA 度量指标的离散性干扰严重,而在结构的最大反应相关参数指标中,中长周期的结构与  $S_a$  关联度比较高<sup>[23]</sup>,所以,在中长周期的结构下对结果数据具有集中性整合的优点, $S_a$  度量指标最为适合。由于采用了长周期的 20 层钢框架结构,所以,DM 度量指标采用结构的最大层间位移角  $\theta_{\max}$ ,IM 指标选择结构在第 1 阶自振周

期下的谱加速度值  $S_a$ 。

### 3.3 极限状态点的确定

作出 IDA 曲线之后,为了进行结构抗震性能评估,根据相应判别准则确定曲线上的极限状态点。基于 IM 准则的极限点状态判据为:当曲线上某一点的地震强度指标 IM 数值达到所规定的极限状态界限值时,即可视这一点为极限状态点。基于 DM 准则的极限点状态判据为:当曲线上某一点的结构损伤指标 DM 数值达到所规定的极限状态界限值时,即可视这一点为极限状态点。由于此极限状态点是某一确定结构自身的失稳倒塌极限状态点,不同于基于 IM 准则的极限点状态判据,对于多条不同的地震动记录都可以采用同一 DM 界限值<sup>[23]</sup>。

### 3.4 超越概率函数

文献[24-25]给出了对结构进行易损性分析时采用的工程结构需求参数在确定的地震动强度量值 IM 下,对结构某一性能水准能力  $L$  的超越概率函数  $P$ ,如式(6)所示,得到结构需求参数  $m$  在该确定的地震动强度值 IM 下服从对数正态分布。

$$P[m \geq L | IM] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln m - \mu_{\ln m | IM}}{\sigma_{\ln m | IM}}\right) \quad (6)$$

式中: $\Phi$  为标准正态分布的分布函数。

## 4 结构-阻尼器系统的易损性评估

### 4.1 基于位移的倒塌易损性评估

选取基于 DM 准则的极限点状态判据,中国规范<sup>[7]</sup>通过此准则规定了钢框架结构倒塌抗震分析时的最大弹塑性位移角为 1/50,即为基于 DM 准则的极限点状态判据的倒塌极限状态点。

对无阻尼器结构、设置粘滞阻尼器、摩擦阻尼器和防屈曲支撑 3 类典型阻尼器结构分别用 IDA 方法进行分析,得到各情况下的结构 IDA 曲线,如图 6 所示。将各条地震动对应的倒塌点极限状态,根据谱加速度  $S_a$  数值由小到大的顺序进行结构在第 1 自振周期的谱加速度的累计概率分布的排序,并采用结合 Matlab 工具拟合式(6)得出结构的倒塌易损性曲线如图 7 所示。

为了对受阻尼器控制下结构的作用效果进行显著区分,采用 CMR 系数,即表征结构实际对地震的抗倒塌性能之于要求设防性能的存储潜力水平<sup>[26-27]</sup>,如式(7)所示。

$$CMR = \frac{S_a(T_1)_{50\%}}{S_a(T_1)_{罕遇地震}} \quad (7)$$

即在 20 层钢框架结构的倒塌作用易损性曲线图所对应的横坐标谱加速度 IM 值在 50% 概率点处

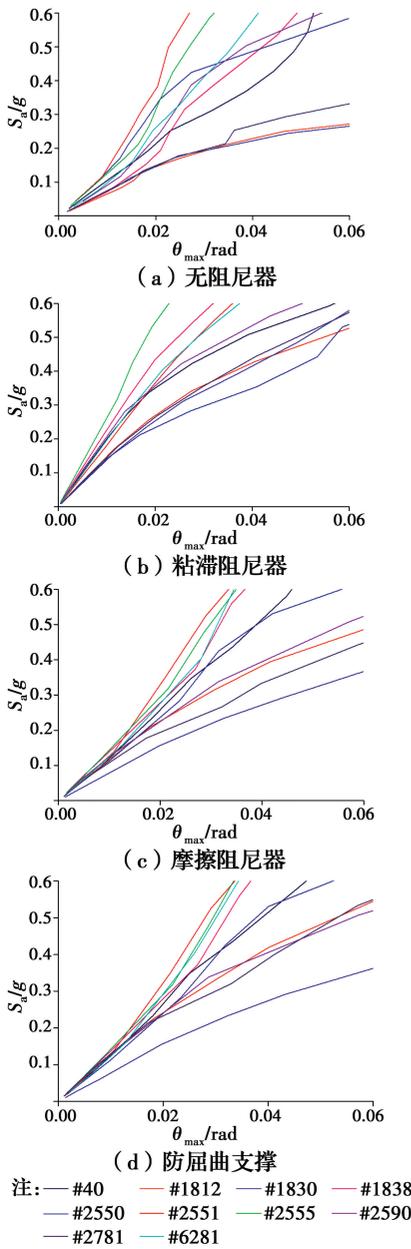


图 6 结构倒塌的 IDA 曲线

Fig. 6 Structure collapse IDA curves

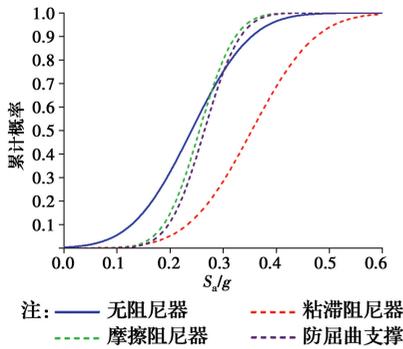


图 7 结构的倒塌易损性曲线

Fig. 7 Structure collapse fragility curves

与遭遇罕遇地震时结构的谱加速度 IM 值的比值计算见表 7。

表 7 IM 值的比值  
Table 7 The ratio of IM

类型	$S_a(T_1)_{50\%}/g$	$S_a(T_1)_{\text{罕遇地震}}/g$	CMR
无阻尼器	0.245 6	0.160 0	1.535 0
粘滞阻尼器	0.355 0	0.119 6	2.968 0
摩擦阻尼器	2.828 0	0.146 2	1.740 0
防屈曲支撑	2.220 0	0.148 3	1.780 0

在以同一减震目标控制在 76% 时设计出来的阻尼器中,对于结构在远场地震下的抗倒塌性能方面,粘滞阻尼器效果最佳,然后是防屈曲支撑,最后是摩擦阻尼器。但当谱加速度达到 0.3g 之后,防屈曲支撑和摩擦阻尼器的控制效果在很高的超越性能概率 80% 下会被无阻尼结构超越,这说明在控制结构的倒塌破坏性能时,防屈曲支撑和摩擦阻尼器并不能很好地起到控制作用,因此,在工程应用中,对于远场地震作用下的建筑结构,推荐设置粘滞阻尼器,以满足自身的抗倒塌性能。

4.2 基于位移的损伤性能水准评估

对比分析在出现结构损伤时设置典型阻尼器结构维持对应设计性能水准的能力,分别采用累积对数正态概率分布的函数关系对无阻尼器结构以及结构在粘滞阻尼器、摩擦阻尼器和防屈曲阻尼器下的 IDA 曲线,拟合了出现损伤破坏时性能量化指标下结构第 1 阶自振周期的谱加速度  $S_a$  的倒塌易损性概率曲线,拟合时采用的结构最大层间位移角对应结构的性能指标如表 8 所示。

表 8 结构性能水准的判别

Table 8 Destruction level reference

破坏级别	参考变形量	最大层间位移角
轻微损坏	$1.5[\Delta u_e] \sim 2[\Delta u_e]$	0.006
中等破坏	$3[\Delta u_e] \sim 4[\Delta u_e]$	0.012
严重破坏	$\leq 0.9[\Delta u_p]$	0.018

表 8 中,  $[\Delta u_e]$  指钢框架结构弹性层间位移角限值,  $[\Delta u_p]$  指钢框架结构塑性层间位移角限值。根据《建筑抗震设计规范》<sup>[13]</sup> 的规定,多、高层钢结构的弹性层间位移角限值  $[\Delta u_e]$  取 0.004, 塑性层间位移角限值  $[\Delta u_p]$  取 0.02。

如图 8 所示,控制结构最大层间位移角大于 0.004 而小于 0.006 ( $1.5[\Delta u_e]$ ) 时,即控制结构轻微损伤性能中,阻尼器的控制效果为粘滞阻尼器最佳,防屈曲支撑稍逊色,摩擦阻尼器虽次之但差别不大;

如图 9 所示,控制结构最大层间位移角大于 0.006 而小于 0.012 ( $3[\Delta u_c]$ ),即控制结构中损伤性能中,阻尼器的控制效果为粘滞阻尼器最佳,防屈曲支撑稍逊色,摩擦阻尼器虽次之但差别不大;如图 10 所示,控制结构最大层间位移角大于 0.012 而小于 0.018 ( $0.9[\Delta u_c]$ )时,即控制结构严重损伤的性能中,阻尼器的控制效果为粘滞阻尼器最佳,防屈曲支撑稍逊色,摩擦阻尼器虽次之但差别不大。

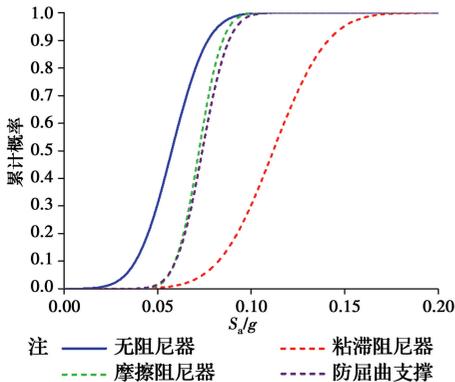


图 8 轻微损伤性能的易损性曲线

Fig. 8 Seismic fragility with slight damage

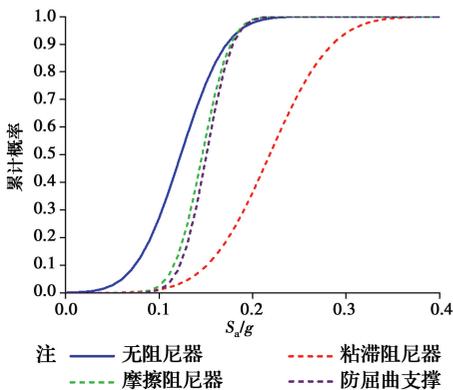


图 9 中等破坏性能的易损性曲线

Fig. 9 Seismic fragility with medium damage

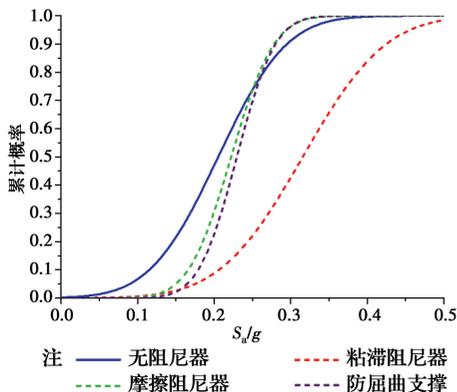


图 10 严重破坏性能的易损性曲线

Fig. 10 Seismic fragility with severe damage

在 3 个性能指标水准下,粘滞阻尼器的表现最为突出。虽然防屈曲支撑稍比摩擦阻尼器更优,但防屈曲支撑和摩擦阻尼器两者表现的控制结构的性能效果差别不大,但需要注意的是,随着性能水准程度的提升,防屈曲支撑和摩擦阻尼器的控制效果甚至在很高的超越性能概率(中等破坏时为 95%,严重破坏时为 83%)下会被无阻尼结构超越,这说明在控制结构中中等损伤和严重破坏的结构性能水准控制范围内,防屈曲支撑和摩擦的控制效果不是很好,但在轻微损伤的结构性能水准下,结构控制性能明显。

## 5 结论

研究了基于中国现行抗震规范所设计的高层建筑-阻尼器系统的地震易损性,评估了中国规范所设计的 3 类典型阻尼器的实际性能。所得结论如下:

1)采用基于位移的性能水准评估指标,与规范中阻尼器设计所选用的指标一致,通过 IDA 分析指出规范所设计阻尼器的实际性能在某些强地震下可能劣于无阻尼器建筑,且不同类型阻尼器的减震效果也有所差异,尤其是速度型和位移型阻尼器差异明显。

2)基于中国规范建立的 20 层钢结构 Benchmark 模型和中国规范所设计阻尼器,在同一减震设计目标需求下,从抵抗结构的抗倒塌概率来看,粘滞阻尼器表现最优,防屈曲支撑和摩擦阻尼器次之,且二者性能接近。

3)采用体现性能水准的结构位移为评价指标时,粘滞阻尼器表现最优,防屈曲支撑虽然略高于摩擦阻尼器,但两者差别不大,在较强地震作用下,出现了设置防屈曲支撑和摩擦阻尼器的结构性能控制效果稍逊原始结构的情况。

## 参考文献:

- [1] 张蓬勃,潘毅,赵世春,等. 双行程可变阻尼力摩擦阻尼器的特性[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 946-952.  
ZHANG P B, PAN Y, ZHAO S C, et al. Hysteresis characteristics of shear friction damper with two resistances and displacements [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 946-952. (in Chinese)
- [2] PARCIANELLO E, CHISARI C, AMADIO C.

- Optimal design of nonlinear viscous dampers for frame structures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 100: 257-260.
- [3] 高剑,王忠凯,潘毅,等.罕遇地震下石化钢结构减震的关键影响因素[J].*土木建筑与环境工程*,2016,38(1):92-99.  
GAO J, WANG Z K, PAN Y, et al. Influence factors of vibration reduction in petrochemical steel structure under rare earthquake [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(1): 92-99. (in Chinese)
- [4] 潘毅,耿鹏飞,郭阳照,等.两阶段耗能屈曲约束支撑体系减震效果分析[J].*西南交通大学学报*,2015,50(5):858-865.  
PAN Y, GENG P F, GUO Y Z, et al. Analysis of damping effect in two-stage energy dissipation damping system of buckling restrained braces [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(5): 858-865. (in Chinese)
- [5] 潘毅,阎勋章,易路行,等.基于剪力比的防屈曲支撑RC框架抗震设计方法研究[J].*工程力学*,2018,35(3):96-105.  
PAN Y, YAN X Z, YI L X, et al. Study on the seismic design of buckling-restrained braced-reinforced concrete frame structures based on shear ratio [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(3): 96-105. (in Chinese)
- [6] 潘毅,高亮,易路行,等.基于剪力比和刚度比的防屈曲支撑-RC框架抗震设计方法分析[J].*世界地震工程*,2017,33(4):59-67.  
PAN Y, GAO X, YI L X, et al. Investigation of the seismic design methods of buckling-restrained braced-reinforced concrete frame structures based on shear ratio and stiffness ratio [J]. *World Earthquake Engineering*, 2017, 33(4): 59-67. (in Chinese)
- [7] SILWAL B, OZBULUT O E, MICHAEL R J. Seismic collapse evaluation of steel moment resisting frames with superelastic viscous damper [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016(7), 126: 26-36.
- [8] LEE J, KANG H, KIM J. Seismic performance of steel plate slit-friction hybrid dampers [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 136(5): 128-139.
- [9] OHTORI Y, CHRISTENSON R E, SPENCER B F JR, et al. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(4): 366-385.
- [10] 徐海波,王广建,易方民,等.中美两国钢结构抗震设计对比分析[J].*工程抗震与加固改造*,2010,32(2):81-86.  
XU H B, WANG G J, YI F M, et al. Comparison and analysis of seismic design of steel structures between Chinese code and American code [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2010, 32(2): 81-86. (in Chinese)
- [11] 宋卫平.中国和美国现行建筑结构设计规范的差异比较[J].*城市建筑*,2013(8):202.  
SONG W P. Comparing the current building structure design code of China and United States [J]. *Urbanism and Architecture*, 2013(8): 202. (in Chinese)
- [12] 曹继涛.中美欧规范钢筋混凝土框架结构抗震设计对比研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.  
CAO J T. Comparative study on seismic design of reinforced concrete frames between Chinese, American and European codes [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 朱春明,钱鹏.中美规范在建筑结构抗震设计中的对比[J].*钢结构*,2018,33(4):86-92.  
ZHU C M, QIAN P. Comparison of seismic provisions in structural design between Chinese and American structure design code [J]. *Steel Construction*, 2018, 33(4): 86-92. (in Chinese)
- [14] 住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 田晴,赵崇锦,王忠凯,等.新疆某超高层住宅楼动力弹塑性分析[J].*土木建筑与环境工程*,2016,38(Sup2):30-34.  
TIAN Q, ZHAO C J, WANG Z K, et al. Elastic and plastic dynamic analysis of a super high-rise residential building in Xinjiang [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(Sup2): 30-34. (in Chinese)
- [16] 住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Load code for the design of building structures: GB 50009-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 李鸿光,何旭,孟光. Bouc-Wen 滞回系统动力学特性

- 的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 2009-2011, 2036.
- LI H G, HE X, MENG G. Numerical simulation for dynamic characteristics of Bouc-Wen hysteretic system [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 2009-2011, 2036. (in Chinese)
- [18] 张蓬勃, 赵世春, 孙玉平, 等. 铝板摩擦材剪切型摩擦阻尼器的研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5): 218-223.
- ZHANG P B, ZHAO S C, SUN Y P, et al. Study on shear type friction damper of aluminum alloy [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(5): 218-223. (in Chinese)
- [19] 马宁, 吴斌, 赵俊贤, 等. 十字形内芯全钢防屈曲支撑构件及子系统足尺试验[J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 1-7.
- MA N, WU B, ZHAO J X, et al. Full scale uniaxial and subassembly tests on the seismic behavior of all-steel buckling-resistant brace [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4): 1-7. (in Chinese)
- [20] 住房和城乡建设部. 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical specification for seismic energy dissipation of buildings: JGJ 297—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [21] 潘毅, 陈侠辉, 王涵平, 等. 无黏结预应力装配式框架结构地震易损性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 71-77.
- PAN Y, CHENG X H, WANG H P, et al. Seismic fragility analysis of unbonded post-tension fabricated RC frame structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 71-77. (in Chinese)
- [22] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Applied incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(2): 523-553.
- [23] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 9-22.
- YE L P, MA Q L, MIAO Z W. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 9-22. (in Chinese)
- [24] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering [C]// 12th European Conference on Earthquake Engineering, Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2002: 479-490.
- [25] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [M]. Stanford, California: Stanford University, 1999.
- [26] 陆新征, 叶列平. 基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 13-18.
- LU X Z, YE L P. Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 13-18. (in Chinese)
- [27] 潘毅, 王初翀, 卢立恒, 等. 建筑结构防连续倒塌分析与设计方法研究进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(1): 52-56, 66.
- PAN Y, WANG C C, LU L H, et al. Advance research on analysis and design methods to resist progressive collapse for building structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(1): 52-56, 66. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)