

# 高烈度区某框架-核心筒结构耗能减震控制研究\*

裘赵云, 缪志伟, 李爱群

(东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

[摘要] 针对位于高烈度区的某高层建筑, 采用高层结构减震控制理论, 选取非线性粘滞流体阻尼器耗能装置对结构进行减震控制。首先基于通用有限元分析软件平台建立了三维结构弹塑性分析模型, 然后分别对多条地震波输入下减震前后结构的动力响应进行了弹塑性时程分析, 并从力、变形和能量三大指标方面对减震前后的结构在多遇和罕遇地震作用下的地震响应结果进行了对比分析。结果表明: 采用非线性粘滞流体阻尼器减震方案可以提高结构的整体抗震性能, 起到良好的减震效果。

[关键词] 减震控制; 框架-核心筒; 粘滞流体阻尼器; 弹塑性时程分析

中图分类号: TU398<sup>+</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0005-05

## Study on energy dissipation and damping control of a frame-tube structure in high seismic intensity region

Qiu Zhaoyun, Miao Zhiwei, Li Aiqun

(Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of China Education Ministry,  
Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Based on the structural control theory, nonlinear viscous dampers were used in a high-rise building in high seismic intensity region to reduce the structural responses under strong earthquakes. Firstly, the 3D finite element model of the structure was established by general finite element software. Then, the nonlinear analysis program was compiled to calculate the seismic responses of the structure after inputting several earthquake waves. The dynamic response of the uncontrolled structure and controlled structure were investigated under the excitation of minor and major earthquake from three aspects of force, displacement and energy. The analysis result indicates that using viscous dampers can effectively improve the structural seismic performance.

**Keywords:** vibration control; frame-tube structure; viscous damper; nonlinear time history analysis

## 0 引言

高层建筑结构为了更好地适应建筑平面使用、景观视野等不断发展的技术要求, 更有效地发挥结构的空作用, 目前多趋向于采用框架-核心筒结构体系<sup>[1]</sup>。对于位于高烈度区的建筑物, 若单纯按照传统的“硬抗”的抗震设计思想, 以既定的“设防烈度”作为设计依据, 依靠结构本身的强度、延性和耗能能力来抵御地震作用, 以满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”<sup>[2]</sup>的抗震设防目标, 将会导致结构的主要构件(框架梁、框架柱和剪力墙)截面过大, 通常需要增设较多数量的剪力墙。

结构减震控制技术是提高结构抗震能力的一种积极有效的手段, 目前已成功地应用于房屋建筑、桥梁、高耸建筑<sup>[3]</sup>。它不是采用加强结构的传统设计方法来提高结构的抗震能力, 而是通过在结构中合理地设置耗能减震装置, 减小主体结构动力响应, 提高结构的安全性能。

粘滞阻尼器作为一种速度相关型耗能装置, 其特点为可在不改变原有结构体系刚度分布的前提下有效耗散输入的能量, 且安装较方便。近些年, 粘滞

阻尼器的计算理论得到充分发展, 同时其内部构造也得到很大改善: 如将单出杆改进成双出杆, 通过调整控制液体流动小孔提高了出力稳定性; 活塞杆用不锈钢代替易磨损的电镀钢杆, 使得阻尼器的使用寿命更长; 由于内部密封装置的改进取消了设在阻尼器外部的储油库, 提高了阻尼器的耐久性。因此文中工程采用设置粘滞流体阻尼器的减震方案。

## 1 工程概况

该框架-核心筒结构位于江苏省宿迁市。建筑总面积为 26 068 m<sup>2</sup>, 建筑层数 20 层, 其中地下 1 层, 地上 19 层, 顶部结合电梯机房、屋面楼梯作为一层, 总高度为 82.6 m。基础埋深 4.8 m, 1 层层高为 5.7 m, 其余标准层层高为 4 m。建筑设计使用年限为 50 年, 抗震设防类别为丙类, 设防烈度为 8 度, 基本地震加速度为 0.3g, 设计地震分组为第一组, 场地类别为 III 类, 场地特征周期为 0.5 s。结构剪力墙

\* 国家自然科学基金青年项目(51008078), 东南大学新进博士科研启动项目(9205000030), 东南大学基本科研业务费创新基金项目(104.205.2.5)。

通讯作者: 缪志伟, 博士, 讲师, Email: zhiweim@gmail.com。

与框架柱的尺寸及混凝土强度等级如表1所示。抗震等级要求:框架一级,核心筒一级。其标准层平面图如图1所示。

剪力墙、柱尺寸及相应的混凝土等级 表1

楼层	剪力墙		柱	
	厚度/mm	混凝土强度等级	截面/mm	混凝土强度等级
1~6	400	C60	1 100 × 1 100	C60
7~13	300	C50	1 100 × 1 100	C50
14~20	300	C40	1 000 × 1 000	C40

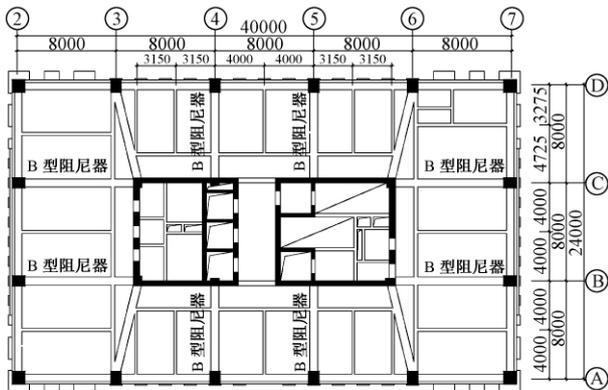


图1 标准层平面图

根据使用功能要求,建筑平面布置中,除中间核心筒区域外,难以在其他部位布置连续的剪力墙。在满足使用功能要求前提下,最大限度地布置剪力墙和框架柱,得到一个结构设计方案,经验算,结构在X和Y方向的多遇地震作用下,层间位移角最大值分别为1/614和1/571,超过规范限值1/800。此时已很难再增设剪力墙数量和增大剪力墙及柱的截面尺寸,显然单纯依靠“硬抗”的传统设计,无法满足该工程的抗震设计要求,故对本工程进行结构减震设计是必要的。

## 2 减震原理及设计方案

### 2.1 粘滞阻尼器的减震原理

非线性粘滞流体阻尼器力-变形关系为<sup>[4]</sup>:

$$F = C \cdot v^\alpha \quad (1)$$

式中: $F$ 为阻尼力; $C$ 为阻尼系数; $v$ 为阻尼器变形速率; $\alpha$ 为阻尼指数。

粘滞阻尼器力学模型如图2所示。其中 $U$ 为阻尼器两端相对位移。粘滞阻尼器对结构不产生附加刚度,作为速度相关型阻尼器,阻尼器对结构两端产生的阻尼力主要与阻尼器两端的相对速度有关。阻尼器力-位移关系滞回曲线包络

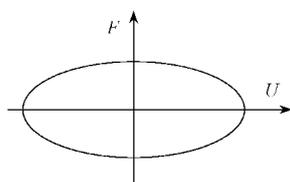


图2 粘滞阻尼器力学模型

的面积越大,阻尼器的耗能能力越大。在MSC.MARC软件中,基于用户二次开发平台对模拟粘滞阻尼器的“连接”赋予上述属性,使其在结构的弹塑性时程分析中发挥耗能作用。

由于建筑物在使用期内遭受多遇地震的概率最大,要求阻尼器在多遇地震下应具有一定耗能效果,同时考虑罕遇地震下阻尼器与结构构件的连接不应破坏,要求罕遇地震下阻尼器的最大出力有一定限值。

含耗能减震装置的多自由度结构体系的相对能量方程<sup>[5]</sup>为:

$$E_k + E_D + E_{sc} + E_H + E_p = E_I \quad (2)$$

式中: $E_k$ 为结构体系的相对动能; $E_D$ 为热能; $E_{sc}$ 为弹性应变能; $E_H$ 为非弹性应变滞回耗能; $E_p$ 为结构体系的耗能器耗能量; $E_I$ 为输入结构体系的相对总能量。

在任意时刻,上述能量方程均保持平衡,但各能量起的作用并不相同: $E_k$ 和 $E_{sc}$ 仅参与能量的转换,并不消耗地震时输入的能量; $E_D$ 只以热能的形式消耗总能量的很小部分,约为5%; $E_H$ 为结构体系的非弹性应变滞回耗能量,在地震作用的持时内,是一个积累的过程。

当结构体系内不附加粘滞阻尼器时,地震输入的总能量大部分都由 $E_H$ 消耗,即通过梁、柱等结构的承重构件产生非弹性往复屈服变形而耗能,地震过后会产生某些构件消耗的能量较多、损坏严重的现象。然而当结构体系内附加粘滞阻尼器时,地震的总输入能量会在结构体系内得以重新分配。这样, $E_H$ 所占耗能份额将很小,进而起到保护结构主要构件的作用。

### 2.2 减震装置布置方案

在适当位置设置粘滞阻尼器,可以有效地增加结构的阻尼比,显著降低结构的地震反应。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[2]</sup>(简称抗震规范)规定:消能部件可根据需要沿结构的2个主轴方向分别设置,消能部件宜设置在层间变形较大的位置,其数量和分布宜通过综合分析合理确定,并有利于提高整个结构的消能减震能力,形成均匀合理的受力体系。

工程沿结构的两个主轴方向在6~9层之间适当位置设置粘滞阻尼器(图3)。粘滞阻尼器的参数取值见表2,减震装置各楼层布置见表3。

由于阻尼器与框架的连接在平面内采取铰接形式,故阻尼器出力时,仅对框架梁、柱上产生附加轴力作用。而且当结构构件内力较大时,即楼层层间

位移较大时,阻尼器两端相对位移也趋于最大,此时根据粘滞流体阻尼器的力学模型可知,其出力较小,即此时阻尼器对框架梁、柱的附加轴力作用很小,近似可忽略。因此只需通过计算保证阻尼器在大震下和框架梁柱的连接构造有效性,而不需要对相连的结构构件进行额外验算。

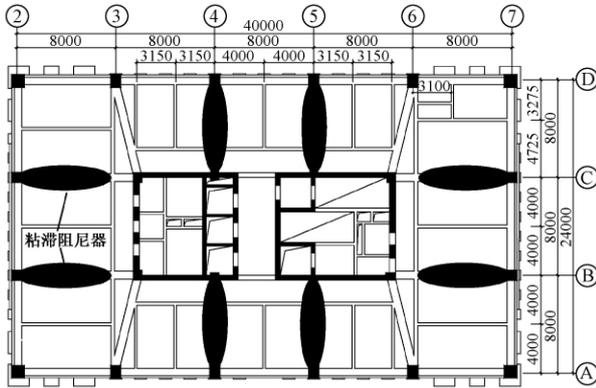


图 3 6~9 层粘滞阻尼器的布置

阻尼器类型 表 2

阻尼器类型	阻尼指数 $\alpha$	阻尼系数 $C/N \cdot m/s$	数量	最大阻尼力 /kN
A	0.25	$1.0 \times 10^6$	88	800
B	0.25	$0.9 \times 10^6$	20	800

各楼层粘滞阻尼器布置情况 表 3

楼层	X 向		Y 向	
	型号	每层数量	型号	每层数量
1~5, 10	A	2	A	2
6~9, 11~14	A	4	A	4
15~19	B	2	B	2

以结构在水平地震作用下各层的层间位移作为减震控制目标,用减震率来度量减震控制的效果。减震率  $\gamma$  按下式计算:

$$\gamma = \frac{\delta_{u,max} - \delta_{c,max}}{\delta_{u,max}} \quad (3)$$

式中  $\delta_{u,max}$ 、 $\delta_{c,max}$  分别为地震作用下无控结构和减震控制结构各楼层层间位移的峰值。

### 3 模型建立

#### 3.1 结构计算程序

减震分析采用两种模型进行,多遇地震作用下的弹性分析采用 ETABS 软件,罕遇地震作用下的弹塑性分析采用 MSC. MARC 软件。

在 ETABS 弹性结构分析模型中,采用空间杆单元模拟框架梁、柱构件;剪力墙采用壳单元模拟;楼板采用板单元模拟;粘滞阻尼器采用 Damper 单元模拟。

在 MSC. MARC 弹塑性结构分析模型中,利用软件提供的用户二次开发平台开发了基于纤维模型原理的 THUFIBER 子程序<sup>[6]</sup>来模拟框架梁、柱构件(图 4),纤维梁模型可以准确考虑轴力和弯矩(单向和双向)的相互关系,并已经过试验验证<sup>[4]</sup>;剪力墙则采用弹塑性分层壳单元模拟,可考虑面内弯曲-面内剪切-面外弯曲耦合作用(图 5),并且已通过试验验证<sup>[7]</sup>;楼板采用弹性壳单元模拟;粘滞阻尼器通过在节点之间设置“连接(Link)”进行模拟。在材料本构关系的选择上,对于模拟剪力墙的分层壳单元,从计算量和精度综合考虑,采用 MSC. MARC 中自带的弹塑性-断裂混凝土本构关系<sup>[8]</sup>。该本构关系中的混凝土材料弹塑性行为基于经典增量弹塑性本构理论,而混凝土断裂行为则采用弥散裂缝模型来描述。对于纤维模型程序中的混凝土和钢筋,分别采用文[6]中定义的单轴应力-应变关系曲线。

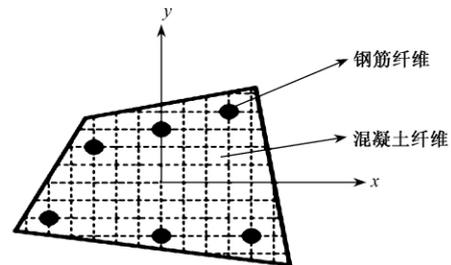


图 4 纤维模型程序中截面划分(钢筋混凝土构件)

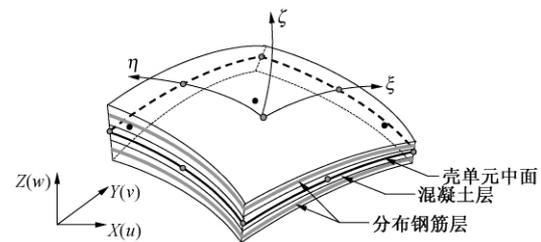


图 5 模拟剪力墙的分层壳单元

#### 3.2 模型建立

分别用 ETABS 和 MSC. MARC 建立如图 6、7 所示的三维分析模型。分别采用 ETABS 和 MSC. MARC 对建立的模型进行模态分析,得到结构各阶模态周期(图 8),并将其与 PKPM 计算得到的结果进行对比。通过模态分析结果的对比分析可知,采用 ETABS 和 PKPM 建立的模型可近似认为是一样的,满足分析要求。

#### 3.3 地震波的选用

选择与该工程所在场地类别相对应的 USER232 波、USER656 波和 USER845 波作为地震动输入进行时程分析,其中 USER232 波(图 9)、USER656 波为天然波,USER845 波为人工波,对结

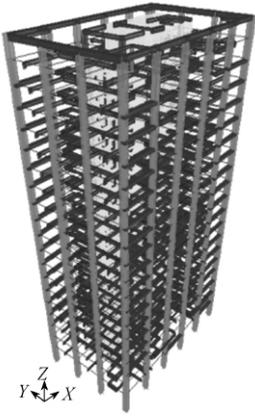


图6 ETABS模型

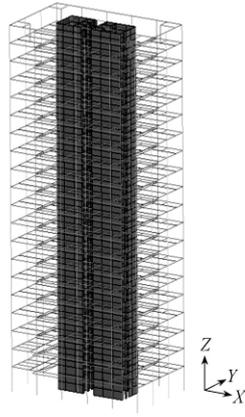


图7 MSC.MARC模型

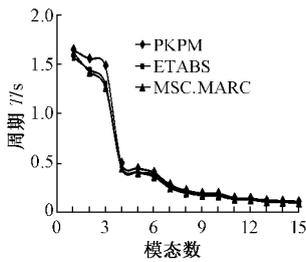


图8 ETABS, MSC.MARC 和 PKPM 模态对比

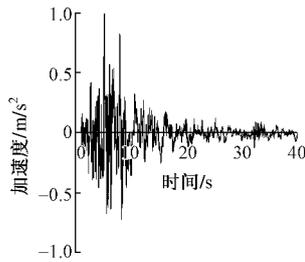


图9 USER232波

构基底总剪力的验算表明,结果均符合抗震规范对于地震波的选择要求。在对结构进行多遇和罕遇地震作用分析时,将这三条地震波的峰值加速度根据结构设防烈度的要求分别调至 110gal 和 510gal,并且分别进行了 X 和 Y 方向输入下的地震响应时程分析。

#### 4 多遇地震作用下的计算结果分析

对原结构和安装阻尼器后的减震结构分别进行多遇地震作用下的地震反应分析。以下仅列出在部分地震波作用下的一些分析结果,其他地震波作用下的分析结果均与此类似。

##### 4.1 层间位移角和层间剪力结果

根据抗震规范要求,框架-核心筒结构在多遇地震作用下,结构楼层的层间位移角限值为 1/800。

以 Y 向 8 度 (0.3g) USER232 波为代表,在其作用下,结构在进行减震前后层间位移角和层间剪力如图 10,11 所示,各层的最小减震率达到了 26%。由两图可以看出,该结构的减震措施是有效的。阻尼器的设置使得减震结构的层间位移和层剪力相对于原结构都有一定程度的减小,并且在多遇地震作用下的最大层间位移角能够满足规范相关限值要求。

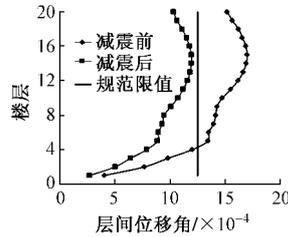


图10 Y向 USER232波作用下层间位移角

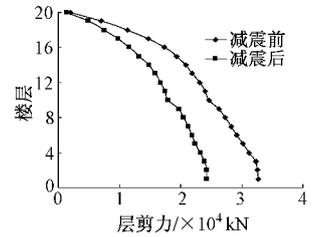


图11 Y向 USER232波作用下层间剪力

#### 4.2 能量结果分析

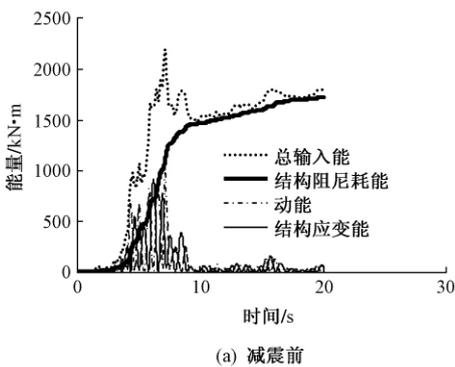
从能量角度出发,给出结构在 Y 向 USER232 波作用下各部分能量分配时程曲线,如图 12 所示。粘滞阻尼器消耗了输入地震动能量的 35% 左右。安装阻尼器后,由于粘滞阻尼器的非线性耗能,结构总应变能明显减小,阻尼器的耗能能力得以发挥。

#### 5 罕遇地震作用下的计算结果分析

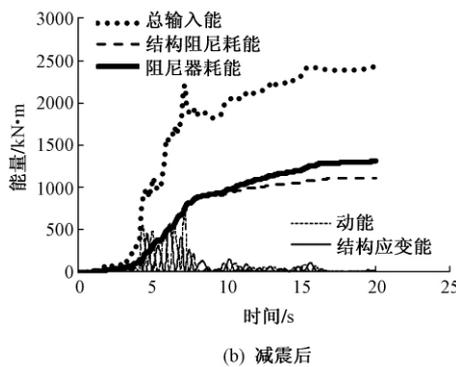
对原结构和安装阻尼器后的减震结构分别进行罕遇地震作用下的弹塑性地震反应分析,主要结果如下。仅列出部分地震波作用下的分析结果。

##### 5.1 层间位移角和基底剪力结果

根据抗震规范要求,框架-核心筒结构在罕遇地震作用下,结构楼层的层间位移角限值为 1/100。以 Y 向 8 度 (0.3g) USER232 波为代表,在其作用下,结构减震前后层间位移角如图 13 所示,各层的最小减震率达到了 27%;图 14 给出了 Y 向罕遇地震作用下,结构基底总剪力的时程图。由图中对比可以看出,罕遇地震作用下,该结构的基底总剪力和层间位移角相对于原结构有一定程度的减小,且均



(a) 减震前



(b) 减震后

图12 能量分配时程图

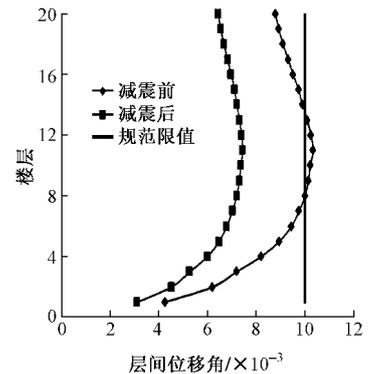


图13 减震前后层间位移角

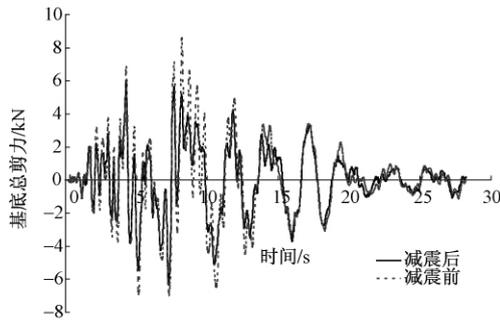


图 14 Y 向 USER232 波作用下基底总剪力时程曲线

满足规范相关限值的要求。

阻尼器的安装使结构满足了规范的限值要求,从而保证了结构在罕遇地震作用下的安全性。层间位移曲线趋于平缓,数值更加接近,这与结构动力特性的分析结果是一致的。由于粘滞阻尼器属于速度相关型阻尼器,主要通过阻尼耗能,图 15 给出结构底层粘滞流体阻尼器的滞回曲线,滞回环饱满,阻尼器充分发挥出其非线性耗能能力。

### 5.2 结构的塑性发展程度结果

Y 向 USER232 波罕遇地震作用下,原结构及减震后结构的塑性发展示意如图 16 所示,其中构件状态表示如下:1) 浅灰色表示结构构件完好,保持弹性;2) 杆系构件(框架梁、框架柱、墙端暗柱)端部出现深灰色及黑色表示该构件端部出现塑性铰(构件中的钢筋纤维屈服),其中黑色表示构件塑性发展

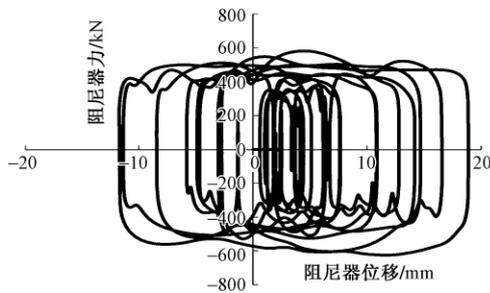


图 15 罕遇地震激励下结构底层粘滞阻尼器滞回曲线

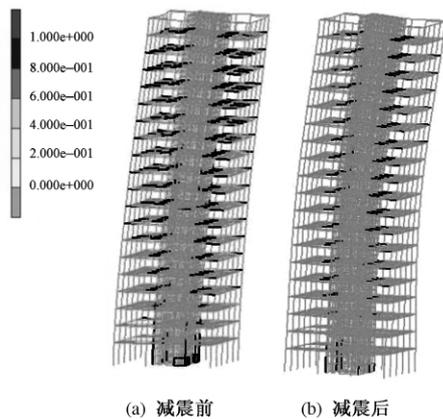


图 16 Y 向罕遇地震作用下减震前后结构塑性发展示意

程度更大,构件中的钢筋纤维最大应变已达到屈服应变的 5 倍以上;3) 墙单元出现黑色表示该单元混凝土应变已经达到压碎应变。

根据图 16 对比可见,采用减震措施后,在 Y 向罕遇地震作用下,相对于原结构,结构中框架梁的塑性铰数量减小,墙端暗柱发生屈服的数量也有所减小,墙根部混凝土没有出现压碎的情况。因此结构整体的塑性发展程度减小,结构整体抗震性能提高。

### 6 结论

(1) 本文建立的框架-核心筒有限元模型,使用在 MSC. MARC 基础上开发的纤维梁和分层壳模型可以准确地完成此类复杂结构的整体弹塑性时程分析,对类似高层 RC 筒体结构的罕遇地震弹塑性计算具有一定的参考意义。

(2) 通过减震前后的对比分析可知,减震后层间位移角满足规范的限制;结构的能量结果曲线、减震前后塑性铰发展对比验证了粘滞阻尼器通过自身的非线性耗能能力,降低了地震过程中主体结构总应变能,从而确保了主体结构的安全。

(3) 阻尼器的介入可明显减小结构的层间位移,安装在外框架部分的 108 个(X, Y 向各 54 个)粘滞阻尼器可提高结构的抗震性能。整体结构的优化是合理的,能增大结构的安全储备。

### 参 考 文 献

[1] 徐卫宾. 钢筋混凝土摩擦耗能支撑框架-核心筒结构的工程应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.

[2] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[3] 欧进萍. 土木工程结构振动的智能控制研究与发展[C]//国际结构控制与健康诊断研讨会论文集, 2000.

[4] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(S2): 131-140.

[5] CHIA-MING UANG, BETREO VITELMO V. Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design[R]. Report No. UCB/EERC-88/18. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1998.

[6] 陆新征, 叶列平, 缪志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[7] 林旭川, 陆新征, 缪志伟, 等. 基于分层壳单元的 RC 核心筒三维全过程有限元分析[C]//第十一届高层建筑抗震技术交流会论文集. 昆明, 2007: 184-189.

[8] MARC. User's manual[M]. MSC. Software Corporation, 2003.