

位移与速度型消能器在某不规则建筑结构抗震设计中的混合应用

赵少伟^{1,2}, 崔红娜¹, 李玉祥¹, 高洪健¹

1. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401

2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401

摘要 某工程为细腰不规则超限结构, 选择纯框架结构, 扭转周期比和层间位移角均不满足规范要求。考虑到建筑外立面效果, 不能在外立面布置剪力墙, 同时在不影响建筑使用功能的前提下, 也没有合适的位置布置全部钢支撑。因此, 经方案比选采用了附加黏滞流体阻尼器和屈曲约束支撑的消能减震结构方案。运用ETABS结构分析软件, 建立三维有限元模型, 采用振型分解反应谱法对无控结构、附加黏滞流体阻尼器结构和同时附加黏滞流体阻尼器及屈曲约束支撑结构进行计算分析, 对比分析了3种结构的动力特性和地震反应。最后, 采用时程分析法对振型分解反应谱法进行了补充计算。结果表明, 黏滞流体阻尼器降低了结构的地震反应, 而屈曲约束支撑降低结构地震反应的同时增加了结构刚度, 有效控制了结构的扭转效应。

关键词 黏滞流体阻尼器; 屈曲约束支撑; 层间位移角; 层剪力; 振型分解反应谱法

中图分类号 TU375.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.18.009

Combined application of displacement-related and velocity-related energy dissipation devices in the aseismic design of an irregular building structure

ZHAO Shaowei^{1,2}, CUI Hongna¹, LI Yuxiang¹, GAO Hongjian¹

1. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China

Abstract A wasp-waisted and irregular overrun building is in consideration. When a pure frame structure is selected, the torsional period ratio and the inter-story drift do not satisfy the requirements in the standards. In view of the external elevation appearance, the arrangement of shear walls on the front plane is not allowed. And there is no suitable position for laying all steel bracing. After a comparison of various schemes, the seismic control plan is designed by using fluid viscous dampers and buckling-restrained braces. In this paper, a three-dimensional finite element model of the structure is established by the ETABS for the calculations of the uncontrolled structure, the structure installed with fluid viscous damper and the structure installed with fluid viscous damper and buckling-restrained brace by the modal shape decomposition response spectrum method. Then, the comparison and analysis of the dynamic characteristics and the seismic response of the three structures are made. Finally, the time-history analysis is carried out. The results show that the fluid viscous damper and the buckling-restrained brace can all reduce the seismic responses effectively. Besides that, the buckling-restrained braces can control the torsion effectively.

Keywords fluid viscous damper; buckling-restrained brace; inter-story drift; floor shear; mode-shape decomposition response spectrum method

收稿日期: 2015-03-08; 修回日期: 2015-07-20

作者简介: 赵少伟, 教授, 研究方向为工程检测与加固技术, 电子信箱: zhaoshaowei@vip.sina.com; 崔红娜(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为工程抗震, 电子信箱: cuihongna1008@163.com

引用格式: 赵少伟, 崔红娜, 李玉祥, 等. 位移与速度型消能器在某不规则建筑结构抗震设计中的混合应用[J]. 科技导报, 2015, 33(18): 56-61.

消能减震自20世纪60—70年代起备受关注。作为一个新的课题,消能减震技术涉及很多领域,至今仍有试验研究和理论论证。被动消能减震技术利用附加于主体结构上的耗能装置,在发生地震尤其是大震时,先于主体结构屈服耗散能量,并提供必要的刚度和阻尼,实现将可能发生于主体结构的破坏转移到易于更换的耗能装置上,达到经济安全的目的^[1]。

近年来,随着减震结构的推广应用,提出了多种消能减震设计和分析。周云等^[2]提出了消能减震结构强振型分解反应谱法和消能减震结构的应用设计方法,欧进萍等^[3]根据速度、位移相关型耗能器的特点提出了速度、位移相关型耗能器的等效刚度、等效阻尼的计算方法;Lin等^[4]提出了直接基于位移的减震结构设计方法;翁大根等^[5]提出基于性能和需求的消能减震设计方法;张志强等^[6]提出以位移和能量为指标的基于性能的消能减震结构的抗震设计方法。以上减震结构设计方法都有很强的理论性,对设计者来说难以操作,目前应用最为广泛的仍是《GB 50011—2010 建筑抗震设计规范》^[7]中的设计方法。

实际工程中,普遍使用的耗能装置有位移相关型和速度相关型。对于已有结构的加固,有些工程中同时应用两种耗能装置,但新建工程中大多只采用一种类型。随着消能减震技术的发展,对于新建建筑中消能装置联合抗震的研究将会越来越多。

本文以一个细腰不规则超限结构工程为背景,通过对无控结构、附加黏滞流体阻尼器结构和同时附加黏滞流体阻尼器及屈曲约束支撑结构的振型分解反应谱分析^[8,9],研究黏滞流体阻尼器和屈曲约束支撑对不规则框架结构的抗震性能的影响。

1 工程概况及结构设计

本工程位于天津市北辰区,根据天津市《关于提高我市学校、医院等人员密集场所建设工程抗震设防标准的通知》(建设[2011]1649号文件)及《GB 50011—2010 建筑抗震设计规范》^[7]规定,本工程为位于7度(0.15g)分区的学校,地震动峰值加速度提高至0.20g,并按8度采取抗震措施。结构体系为框架结构,设计使用年限50年,安全等级二级。建筑场地类别为III类,特征周期为0.55s。建筑地下1层,地上8层,标准层高为5.1m,结构总高度40.5m。建筑大部分楼层平面呈细腰的“工”字形,平面外围尺寸74m×84m,仅第2层(单侧封板)、第6层及第8层细腰处封板后楼层平面呈梯形,标准层平面如图1所示。主楼东、西立面外倾,倾角为10°。对结构进行常规设计,在不影响使用要求的情况下尽量减小结构扭转效应。对结构进行建模分析,得出多遇地震下结构的x、y向的最大层间位移角均为1/303,且均在第5层,不满足GB 50011—2010规范1/550的限值要求。由于建筑与结构的限制,采用传统“硬抗”设计无法满足抗震要求。故需采用附加耗能减震装置提高结构的抗震能力。

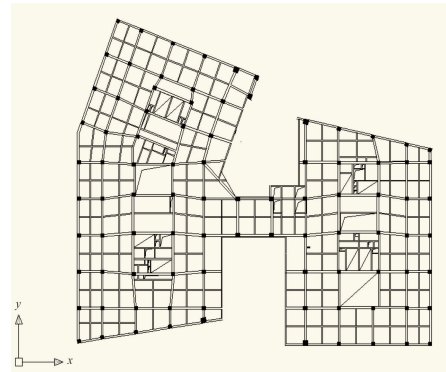


图1 标准层结构平面

Fig. 1 Structure plan view of standard layer

2 计算模型及动力特性分析

为了研究结构动力特性并为结构减震设计提供依据,采用ETABS结构分析软件,建立结构的三维有限元模型,如图2所示。

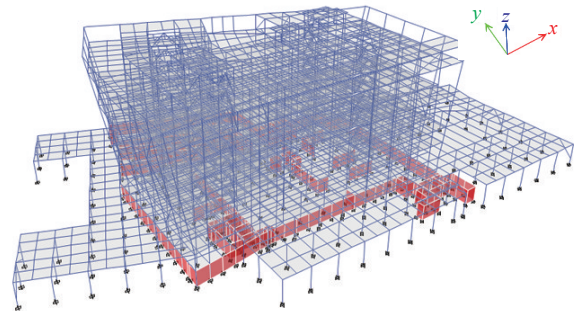


图2 三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model of the structure

对未附加消能减震装置的无控结构进行模态分析,得结构的自振周期,如表1所示。

表1 无控结构的动力特性

Table 1 Dynamic characteristics of uncontrolled structure

振型	周期/s	振型质量参与系数/%		
		x向	y向	z向
1	1.91	56.95	0.06	0.41
2	1.85	0.22	55.31	0.25
3	1.72	1.13	1.82	42.29

由表1可以看出,结构的第1振型为以x向平动为主,振型参与系数为56.9%,第2振型为以y向平动为主,振型参与系数为55.3%,第3振型为以扭转为主,振型参与系数为

42.3%。结构的振型第3阶出现扭转振型,满足《高层建筑混凝土结构技术规程》中高层建筑结构的第1、2阶振型不能出现扭转振型的规定。结构的第1平动周期为 $T_1=1.91$ s,第1扭转周期 $T_{\text{扭}}=1.72$ s,扭转周期比为 $T_{\text{扭}}/T_1=0.901$,不满足《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》中,A级高度的高层建筑,结构扭转为主的第1自振周期与平动为主的第1自振周期之比不应大于0.9的规定^[7]。故需要附加能够提高结构抗扭刚度的耗能减震装置。

3 结构减震设计与分析

3.1 结构减震设计

为减小结构层间位移,使其满足《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》要求,在结构上附加减震装置以达到减震效果^[9,10]。本文设计了两种减震方案。方案1为只附加黏滞流体阻尼器^[11],选用黏滞流体阻尼器的阻尼系数为 $1700 \text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^a$,阻尼指数 a 为0.2,最大行程为 ± 70 mm,最大阻尼力为1200 kN。根据无控结构的地震反应,黏滞流体阻尼器均匀地布置在层间位移较大的第3、4、5、6、7、8层,每层布置5个。方案2为附加黏滞流体阻尼器后再附加屈曲约束支撑,在方案1的基础上,为了使结构 x 、 y 方向上的动力特性接近,尽量使结构的质量中心与刚度中心重合;结构每层均匀设置屈曲约束支撑,考虑到结构的布局及安装要求,在结构的外立面设置型号JY-SD-7000的屈曲约束支撑,楼电梯间周围设置型号JY-SD-6000的屈曲约束支撑。其平面布置如图3所示。屈曲约束支撑参数如表2所示。

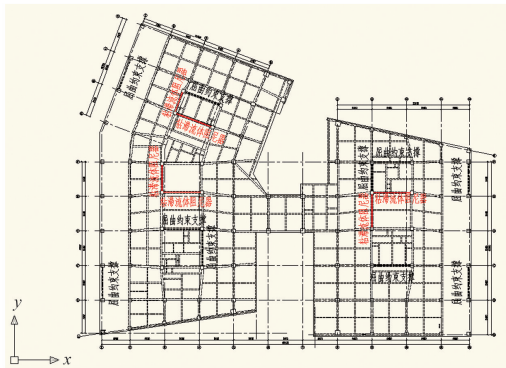


图3 黏滞流体阻尼器和屈曲约束支撑平面布置

Fig. 3 Plane layout of fluid viscous damper and buckling-restrained brace

表2 屈曲约束支撑参数

Table 2 Parameters of buckling-restrained braces

产品参数	产品构件长度/mm	屈服力/kN	极限力/kN
JY-SD-6000	6000	6000	> 7000
JY-SD-7000	3900	7000	> 8000

3.2 动力特性分析

采用ETABS结构分析软件,建立减震方案的结构模型,并进行模态分析,得到两种方案下结构的动力特性(表3)。

表3 结构的动力特性

Table 3 Dynamic characteristics of structure

方案	振型	周期/s	振型质量参与系数/%			周期比
			x向	y向	z向	
方案1	1	1.9047	56.8601	0.0844	0.4376	$T_{\text{扭}}/T_1=0.902$
	2	1.8484	0.2711	55.3062	0.2615	
	3	1.7177	1.1727	1.8027	42.2792	
方案2	1	1.3987	11.5085	45.9369	0.3671	$T_{\text{扭}}/T_1=0.840$
	2	1.3704	45.4778	11.2526	1.2742	
	3	1.1742	1.3424	0.2776	43.2798	

由表3和表1可以看出,3种结构的前两阶模态均为平动,第3阶模态为扭转。无控结构和方案1结构的周期比均为0.902,不满足《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》要求。由此可知,仅布置黏滞流体阻尼器,对结构的自振周期没有影响,说明黏滞流体阻尼器不改变结构刚度。方案2的周期比为0.840,满足《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》要求,对比方案1和方案2可知,附加屈曲约束支撑的结构,自振周期发生较大的改变,表明附加屈曲约束支撑后结构刚度发生了变化。

3.3 地震反应分析

为表述方便,3种结构分别定义为表4所示3个工况。

表4 3种工况的结构类型

Table 4 Structure types of three operating conditions

工况	结构类型
工况1	无控结构
工况2	方案1结构
工况3	方案2结构

3.3.1 层间位移角的对比分析

图4中0层为结构地下1层,10层为机房屋面。由图4和图5可看出,各工况中第5层的层间位移角最大。相比于无控结构,方案1的层间位移角最大值下降约30%,而方案2又较方案1的层间位移角最大值下降约35%。多遇地震时,无控结构与方案1的最大层间位移角分别是1/303和1/422,均不符合《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》中1/550的限值要求^[8],而附加黏滞流体阻尼器与屈曲约束支撑的结构的层间位移角最大值为1/677,满足《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》要求。此外可看出,结构在第9层和第10层,方案1的层间位移角值小于方案2的层间位移角值,可能是由屈曲约束支撑的布置导致第10层相对柔性变大所引起。罕遇地

震时,对同时附加2种耗能装置的结构进行弹塑性变形验算,弹性分析的层间位移角最大值为1/111,考虑弹塑性层间位

移增大系数后,弹塑性变形满足《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》要求^[8]。

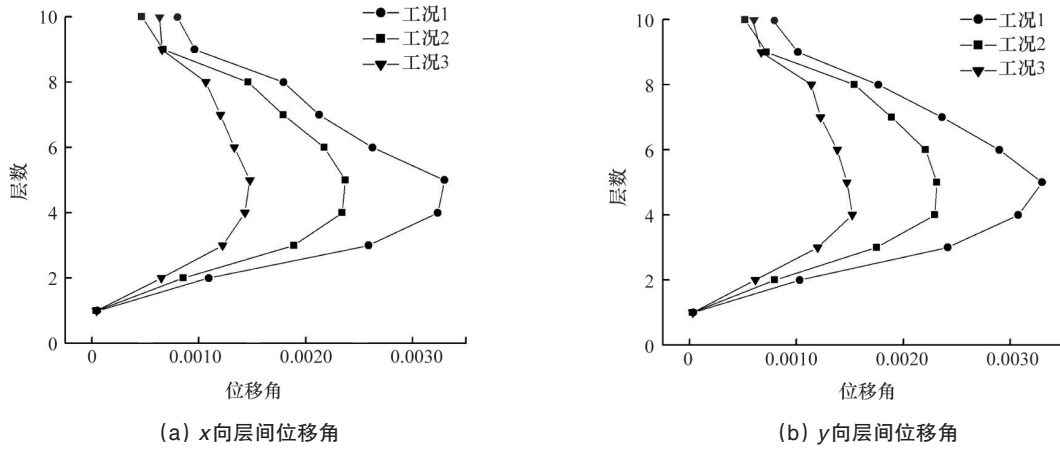


图4 多遇地震时各工况层间位移角

Fig. 4 Inter-story drift under three operating conditions under frequent earthquake action

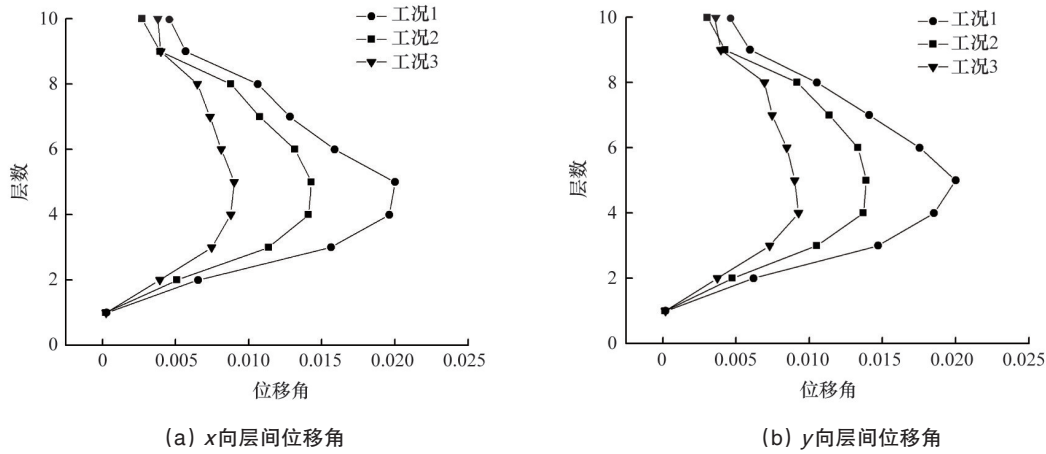


图5 罕遇地震时各工况层间位移角

Fig. 5 Inter-story drift under three operating conditions under rare earthquake action

3.3.2 层剪力的对比分析

由图6(a)、图7(a)可知,3种工况的层间剪力值由大到

小的顺序依次是无控结构、方案2结构和方案1结构,黏滞流体阻尼器的设置增加了结构的阻尼比,但是不增加结构

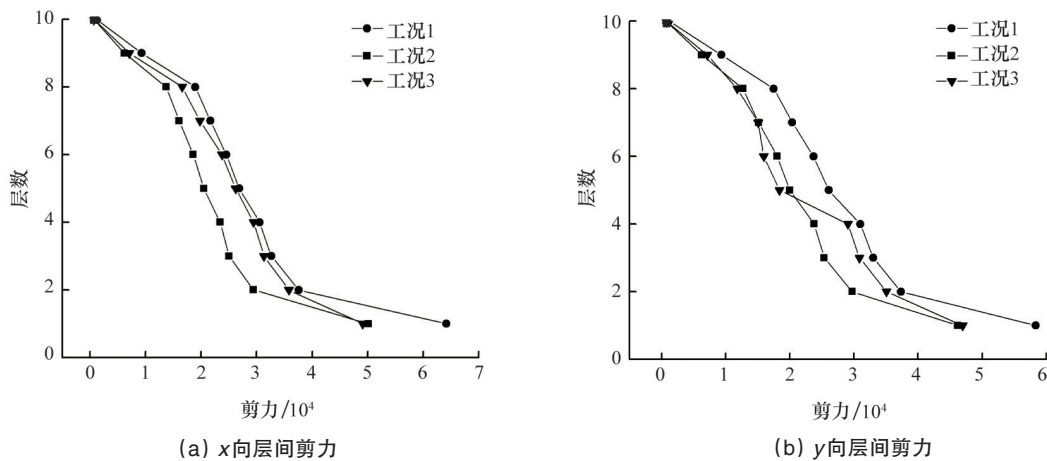


图6 多遇地震时各工况的层间剪力

Fig. 6 Floor shear under three operating conditions under frequent earthquake action

的刚度,所以方案1的层剪力值最小;而方案2屈曲约束支撑的设置,增加了结构的阻尼比,也加大了结构的刚度,降低了结构的自振周期,从而加大了结构的地震反应,所以方

案2的层间剪力值大于方案1。由图6(b)、图7(b)可知,在第5、6层处的y向,方案2的层间剪力小于方案1,这应该是由屈曲约束支撑在y向上各楼层的布置数量差异引起。

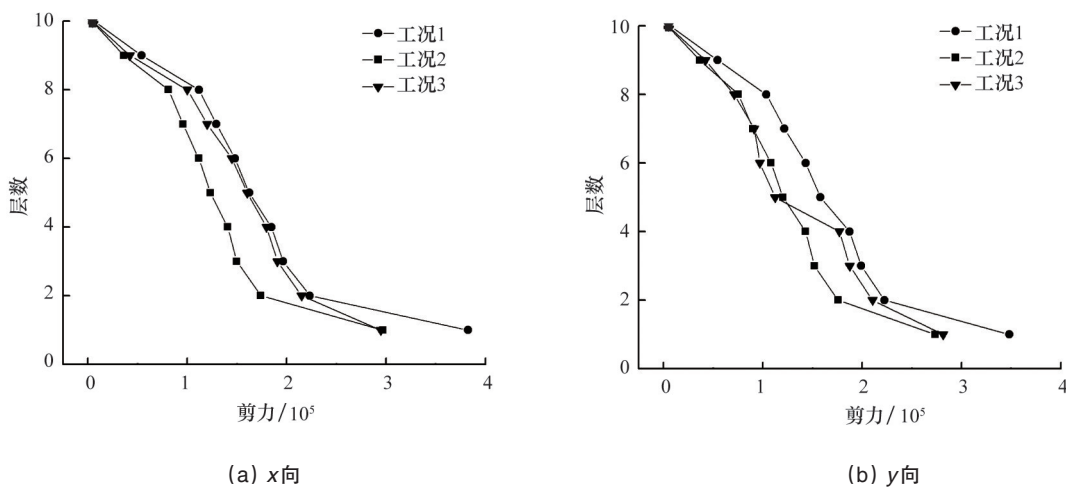


图7 罕遇地震时各工况的层间剪力

Fig. 7 Floor shear under three operating conditions under rare earthquake action

4 减震结构时程分析

由于本结构为不规则结构,抗震《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》规定,复杂工程应采用时程分析进行多遇地震下的补充计算。选取2条天然地震波 Superstition Hills 波和 Palm Springs 波和1条人工波 RG 波,考虑双向地震作用,水平主向、次向的加速度峰值按《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》1.0:0.85的比例系数进行调幅,对减震结构进行多遇和罕遇地震时程分析。

4.1 多遇地震时程分析

对附加黏滞流体阻尼器和屈曲约束支撑的减震结构进行多遇地震下的时程分析,结构的地震反应如表5和表6所示。

由表5可以看出,时程分析时,3条波作用下层间位移角最大值均小于反应谱计算结果。这说明根据振型分解反应

表5 多遇地震作用下结构层间位移角

Table 5 Inter-story drift under frequent earthquake action

分析方法	非线性分析层间位移角		
	x向	y向	
时程分析法	Superstition Hills	1/827	1/690
	Palm Springs	1/1044	1/1203
	RG	1/832	1/807
	平均值	1/891	1/895
反应谱法	CQC法	1/677	1/657

谱法计算的结构层间位移角结果设计偏于安全。

《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》规定:弹性时程分析时,所选每条时程曲线计算所得的结构底部剪力应不小于振型分解反应谱法计算结果的65%,多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值应不小于振型分解反应谱法计算结果的80%。由表6可知,所选3条地震波满足《GB 50011—2012 建筑抗震设计规范》要求,是合理的。

表6 多遇地震作用下结构首层地震剪力

Table 6 Floor shear under frequent earthquake action

分析方法	非线性分析地震剪力/kN		
	x向	y向	
时程分析法	Superstition Hills	41687.51	42947.63
	Palm Springs	36768.02	31985.93
	RG	40717.82	38813.80
	平均值	39724.45	3791579
反应谱法	CQC法	49100.68	46960.33

4.2 罕遇地震时程分析

对附加黏滞流体阻尼器和屈曲约束支撑的减震结构进行罕遇地震下的时程分析,结构的地震反应如表7和表8所示。

由表7及表8可知,对于最大层间位移角和首层剪力,总体来说,时程分析结果比振型分解反应谱法小,因此根据振型分解反应谱法进行结构设计是偏于安全的。

表7 罕遇地震作用下结构层间位移角

Table 7 Inter-story drift under rare earthquake action

分析方法		非线性分析层间位移角	
		x向	y向
时程 分析法	Superstition Hills	1/119	1/98
	Palm Springs	1/146	1/158
	RG	1/123	1/121
	平均值	1/128	1/121
反应谱法	CQC法	1/111	1/108

表8 罕遇地震作用下结构首层地震剪力

Table 8 Floor shear under rare earthquake action

分析方法		非线性分析地震剪力/kN	
		x向	y向
时程 分析法	Superstition Hills	219695.01	214331.25
	Palm Springs	248529.00	219560.07
	RG	307694.00	307904.00
	平均值	258639.34	318708.86
反应谱法	CQC法	294660.31	281486.60

5 结论

以实际工程项目为例,比较了附加黏滞流体阻尼器结构和附加黏滞流体阻尼器及屈曲约束支撑结构的减震效果。

1) 结构附加黏滞流体阻尼器后,扭转周期比与无控结构相同,可见黏滞流体阻尼器没有改变结构的刚度和自振周期,不能改善结构的扭转效应。附加屈曲约束支撑后扭转周期比减小,可见屈曲约束支撑改变了结构的刚度和自振周期,能有效减小结构的扭转效应。

2) 设置黏滞流体阻尼器后结构层间位移角最大值下降了30%,而同时设置黏滞流体阻尼器和屈曲约束支撑的结构又较只附加黏滞流体阻尼器的结构层间位移角最大值下降了35%。

3) 层剪力大小依次为无控结构、附加黏滞流体阻尼器及屈曲约束支撑结构和附加黏滞流体阻尼器结构,可见,由于附加了屈曲约束支撑,增大了结构的刚度,导致结构的层剪力增大。

4) 用时程分析法对振型分解反应谱法进行补充计算,证明了采用振型分解反应谱法的合理性。

参考文献 (References)

- [1] 于敬海, 姜旋. 被动消能减震技术的工程应用分析[J]. 低温建筑技术, 2014(3): 46-48.
Yu Jinghai, Jiang Xuan. Application analysis of seismic energy dissipation technique[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014(3): 46-48.
- [2] 周云, 周福霖. 耗能减震体系的能量设计方法[J]. 世界地震工程, 1997, 13(4): 8-12.
Zhou Yun, Zhou Fulin. Energy design method for structural system with energy dissipative devices[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1997, 13(4): 8-12.
- [3] 欧进萍, 吴斌, 龙旭. 耗能减振结构的抗震设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(2): 102-105.
Ou Jinping, Wu Bin, Long Xu. Seismic design method of energy dissipation system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(2): 102-105.
- [4] Lin Y Y. Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 25-37.
- [5] 翁大根, 张瑞甫, 张世明, 等. 基于性能和需求的消能减震设计方法在震后框架结构加固中的应用[J]. 建筑结构学报, 2010(增2): 66-68.
Weng Dagen, Zhang Ruifu, Zhang Shiming, et al. Application of energy dissipation method in post-earthquake RC frame retrofit based on performance and demand[J]. Journal of Building Structure, 2010(Suppl 2): 66-68.
- [6] 张志强, 李爱群. 建筑结构黏滞阻尼减震设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Zhang Zhiqiang, Li Aiqun. Viscous damper in the aseismic design of building structure[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [7] 中国建筑科学研究院. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [8] 李爱群, 丁幼亮. 工程结构抗震分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
Li Aiqun, Ding Youliang. Aseismic analysis engineering structures[M]. Beijing: The High Education Press of China, 2010.
- [9] 周云. 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, 2007.
Zhou Yun. The design and application of the structure with buckling-restrained brace[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [10] 周云, 邓雪松, 汤统壁, 等. 中国(大陆)耗能减震技术理论研究、应用的回顾与前瞻[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(6): 1-15.
Zhou Yun, Deng Xuesong, Tang Tongbi, et al. State of the art and prospect of energy dissipation technology in China Mainland[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(6): 1-15.
- [11] 叶正强, 李爱群, 楼宇. 粘滞流体阻尼器用于建筑结构的减震设计原理与方法[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 87-90.
Ye Zhengqiang, Li Aiqun, Lou Yu. Design principle and method of structural vibration energy dissipation using fluid viscous dampers[J]. Architectural Structure, 2008, 38(8): 87-90.

(编辑 陈华姣)