

# 金属连梁阻尼器在高层剪力墙结构的设计方法

戴君武<sup>1,2</sup>,景 铭<sup>1,2</sup>,刘永彬<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要** 目的 研究金属连梁阻尼器在高层剪力墙结构的设计,解决在高层剪力墙结构连梁中如何合理的布置金属阻尼器的问题.方法 使用钢剪切型阻尼器对某高层剪力墙结构进行消能减震设计,从减震原理出发,展现阻尼器如何通过为结构提供更大的附加阻尼比和影响结构的主振周期,进而降低结构的水平地震影响系数,实现显著降低结构在地震作用下的反应的过程,并对消能减震结构进行经济技术分析.结果 阻尼器的设置增大了单位工程造价,但可使结构在地震下使用功能连续,虽然略增大造价,但保证了建筑物的安全及功能;基底剪力可减小 13%~42%,最大层间位移角可减小 15%~47%,倾覆力矩可减小 32%~52%,保障了人民的人身安全和财产安全.结论 通过计算无控结构在多遇地震下的层间位移以及结构待布置连梁位置处的内力,确定阻尼器的设计屈服位移和屈服力,并将阻尼器均匀的布设在每一层可大大降低结构的地震反应,为工程人员进行类似的高层剪力墙消能减震设计提供了经验和参考;阻尼器的设置虽然导致造价略有增加,但可显著的降低结构各项指标在地震作用下的反应.

**关键词** 高层剪力墙;连梁阻尼器;减震效果;经济技术分析

中图分类号 TU352;TU398

文献标志码 A

## The Design Method of High-rise Shear Wall Structure by Using Metal Coupling-beam Dampers

DAI Junwu<sup>1,2</sup>, JING Ming<sup>1,2</sup>, LIU Yongbin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, China, 150080; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin, China, 150080)

**Abstract:** This paper studied the design process of metal coupling-beam dampers in high-rise shear wall structure, and solved the problem of how to arrange the dampers reasonably in high shear wall structures. The steel shearing dampers were utilized to do energy dissipation suspension design in high-rise shear wall structures. This paper showed the process of how the dampers could lower the level of the earthquake affecting coefficient by providing additional damping ratio and lower the

收稿日期:2017-10-18

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAK17B02);地震行业科研专项经费项目(201508023)

作者简介:戴君武(1967—),男,研究员,博士研究生导师,主要从事结构抗震减震方面研究.

structural vibration period thus reducing the seismic structural response. The economic technique analysis for the passive energy dissipation structure was also conducted, the results showed that although the arrangement of the dampers slightly increased the construction cost, but could make sure the function of the structure could not be interrupted in the earthquake; Base shear could be reduced by 13% ~ 42%, maximum inter-story displacement angle could be reduced by 15% ~ 47%, overturning moment could be reduced by 32% ~ 52%. By calculating the story displacement and the stress of the coupling beams to define the damper design yield displacement and yield force and then decorate the dampers to each floor could significantly reduce the seismic response of structures. Precious experience could be referenced by engineering personnel to do seismic energy dissipation design in similar high-rise shear wall structures. A smaller increase in investment could return for a big safety of buildings and functions.

**Key words:** high-rise shear wall structure; coupling-beam damper; damping effect; economic technique analysis

随着对土木工程结构在地震作用下破坏机制的深入研究,基于性态的抗震设计思想已经应用于新建的工程项目中.同时,震后可快速恢复功能结构体系是在基于性态的地震工程指引下发展起来的.剪力墙结构是建筑结构中一种重要的结构体系,在高层住宅中应用最为广泛,而连梁是剪力墙结构体系中的重要构件,直接影响剪力墙与连梁之间的内力分配,进而影响剪力墙结构体系在地震作用下的损伤分布和破坏模式.为了实现基于性态的抗震设计,并实现剪力墙结构体系震后可快速恢复功能,可更换的消能连梁在剪力墙结构体系中的应用越来越广泛<sup>[1-4]</sup>.

与传统连梁相比,消能连梁可以使结构体系受力更合理,并且明显提高结构的耗能能力,进而减小结构在地震作用下的反应和损伤程度.通过剪力墙结构体系的受力分析可以明确剪力墙和连梁之间的内力分配,通过调整不同部位连梁的屈服力和刚度使剪力墙与连梁之间受力更均匀,从而避免薄弱层的出现,进而控制其损伤分布和破坏模式.同时,消能连梁中的阻尼器可以为结构在地震时提高较大的阻尼,因而可以减小结构地震反应和损伤程度<sup>[5-8]</sup>.目前在消能减震结构的设计过程中,国内外很多学者针对如何合理地选择阻尼器参数和有效布置位置提出了许多观点;L. M. Moreschi<sup>[9]</sup>根据遗传算法优

化了阻尼器的最优设计参数. M. Gürgöze<sup>[10]</sup>通过控制结构能量最低,优化了阻尼器的分布;潘鹏等<sup>[11]</sup>认为剪力墙结构上层连梁的剪切位移大,阻尼器布置在结构上层连梁处,这个观点与郭迅等<sup>[12]</sup>在模块化钢滞变阻尼器使用方法专利中提出的观点一致.然而,程志辉<sup>[13]</sup>认为应集中将阻尼器分布在下层以减小层间位移角.关于消能连梁设计方法的问题,潘超等<sup>[14]</sup>提出了基于性能的消能连梁设计方法;孙柏涛等<sup>[15]</sup>也通过时程分析结果优化了阻尼器的参数.李东晗等<sup>[16]</sup>提出一种新型金属阻尼器以及设计流程以便于实际应用.基于此,笔者使用剪切型阻尼器对某高层剪力墙结构进行消能减震设计,以有效减小结构在多遇地震和罕遇地震下的层间位移角、基底剪力和倾覆力矩为目标进行设计.计算结果表明将剪切型金属阻尼器布置在结构连梁中可有效减低结构在地震作用下的反应,提升建筑物的抗震性能.

## 1 工程概况

本建筑地上34层,地下2层,房屋高度99.30 m.结构高宽比7.301.建筑单体由3个结构单元组成,与相邻住宅单元间设防震缝分开.本工程抗震设防烈度较高,为7度(0.1 g).

2 消能减震设计的可行性

阻尼器的选型和布置方式应根据阻尼器的受力特点、结构形式、建筑功能和经济性确定.本工程为钢筋混凝土剪力墙结构,使用功能为住宅,采用位移型金属连梁阻尼器较为适宜,主要考虑以下原因.

(1)连梁在地震作用下的内力和变形较大,剪力墙结构能够提供足够数量的连梁.

(2)金属连梁阻尼器替换钢筋混凝土连梁后可以限制连梁的最大剪力,解决其抗弯承载力不足的问题,保证其足够的耗能能力.

跨高比不大于 2.5 的连梁:

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.15 f_c b_b h_{b0}). \tag{1}$$

跨高比大于 2.5 的连梁:

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.20 f_c b_b h_{b0}). \tag{2}$$

式中:V 为连梁剪力设计值;b<sub>b</sub>、h<sub>b0</sub> 分别为连梁截面宽度、有效高度.

(3)采用金属连梁阻尼器,对使用功能和室内外观感基本没有影响,且容易更换.

(4)金属阻尼器的耐久性较好,可保证与主体结构相同的设计使用年限.

3 抗震设防目标

笔者依据《建筑消能减震技术规程》(JGJ297—2013),将消能减震结构的抗震设

防目标设置为:当遭受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震影响时,消能部件不处于耗能工作状态,主体结构不受损坏或不需要修理,可继续使用;当遭受相当于本地区抗震设防烈度的设防地震影响时,消能部件大部分不处于线性耗能工作状态,少部分部件屈服耗能,主体结构可能发生损坏,但如果经一般修理仍可继续使用;当遭受高于本地区抗震设防烈度的罕遇地震影响时,消能部件处于非线性耗能工作状态,主体结构不致倒塌或发生危及生命的严重破坏<sup>[17-18]</sup>.

4 阻尼器的布置

4.1 阻尼器布置原则

(1)阻尼器宜根据需要沿结构两个主轴方向设置,形成均匀合理的结构体系.

(2)位移型阻尼器宜设置在层间相对变形较大的位置.

(3)阻尼器的设置数量应根据多遇地震下的预期减震要求及罕遇地震下的预期结构位移控制要求确定.

(4)阻尼器的设置,应便于检查、维护和替换.

4.2 阻尼器布置平面

根据以上原则并经反复计算分析后确定的阻尼器平面和竖向布置位置详见图 1.

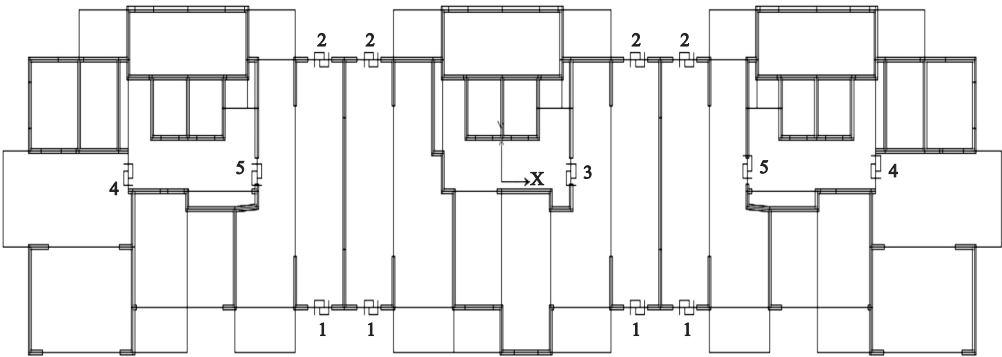


图 1 阻尼器平面布置

Fig. 1 The layout of the dampers

阻尼器布置于4~34层,每层13套, $X$ 向(长轴方向)8套, $Y$ 向(短轴方向)5套,使用5种型号的阻尼器,共计403根.这些部位的连梁如果采用钢筋混凝土连梁,则部分出现斜截面剪压比不能满足规范要求的情况.

4.3 阻尼器参数

位移型金属连梁阻尼器的塑性滞回变形工作方式一般分为钢板平面内剪切型和钢板平面外弯曲型.本工程采用钢板平面内剪切

型,即依靠钢板平面内剪切变形耗能,其基本构造如图2所示.钢材采用低屈服点钢.阻尼器的滞回曲线如图3所示,其本构关系可简化为双折线模型,其技术参数见表1.图中, $x_y$ 为阻尼器的屈服位移; $x_m$ 为阻尼器的极限位移; $k$ 为阻尼器的屈服前刚度; $\alpha_s$ 为阻尼器的屈服后刚度比; $f_y$ 为阻尼器的屈服力; $f_m$ 为阻尼器的极限承载力.

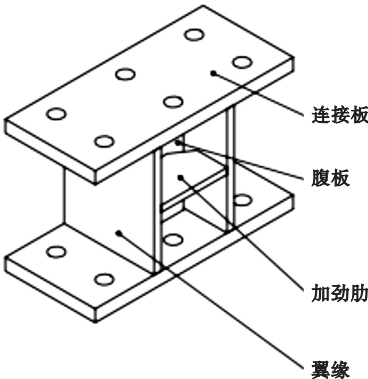


图2 金属连梁阻尼器构造示意

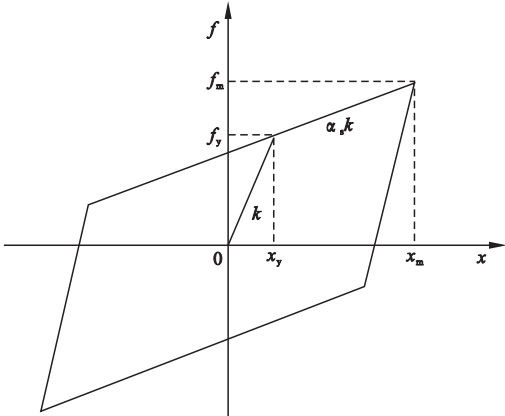


图3 金属连梁阻尼器简化滞回模型

Fig. 3 The simplified typical hysteretic curve of the dampers

表1 金属连梁阻尼器技术参数

Table 1 The technical parameters of the dampers

阻尼器编号	方向	屈服力/kN	屈服位移/mm	屈服前刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	屈服后刚度比
1	X	50	0.8	62 500	0.15
2		80	0.8	100 000	0.15
3	Y	80	1.5	53 333	0.15
4		100	1.5	66 666	0.15
5		120	1.5	80 000	0.15

在本工程中首先计算无控结构在多遇地震下的弹性层间位移角以及待布置位置处连梁的内力.以多遇地震下结构的平均层间位移确定阻尼器在 $X$ 和 $Y$ 两个方向的设计屈服位移分别为0.8 mm和1.2 mm,以多遇地震下待布置连梁处所受剪力大小确定阻尼器的设计屈服力.该设计方法既可有效的控制阻尼器在多遇地震作用下不屈服又控制了各个阻尼器在设防地震以及罕遇地震下同时进入屈服,变形协调一致.

5 消能减震结构的水平地震作用效应分析

5.1 计算软件和分析方法

- (1) 计算程序采用 ETABS 程序.
- (2) 结构地震作用计算采用动力时程分析.非消能减震结构采用振型分解法,消能减震结构采用考虑边界非线性的 FNA 法.
- (3) 静力荷载工况采用静力弹性分析方法.

5.2 结构计算分析模型

(1)消能减震结构和非消能减震结构均采用空间有限元模型,差别仅在于消能减震模型的阻尼器采用非线性连接单元.图4为消能减震结构计算模型三维图.

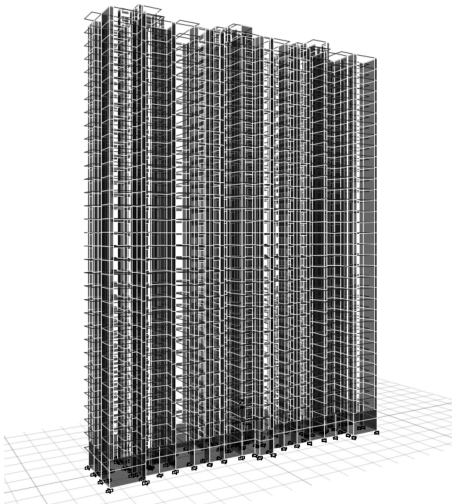


图4 消能结构计算模型

Fig.4 The calculation model of the energy dissipation structure

(2)梁柱均采用梁单元,剪力墙采用壳单元,楼板采用平面内刚性楼板假定(楼板束缚).

(3)阻尼器采用ETABS提供的非线性连接单元 Plastic(wen),考虑单轴剪切自由度.

(4)混凝土结构的阻尼采用统一振型阻尼比0.05模拟,框架梁刚度考虑楼板的刚度放大作用.

5.3 地震波的选取

根据Ⅲ类场地、设计地震分组以及规范要求等,地震波选用2条人工模拟波和5条实测波.地震波时程曲线见图5.

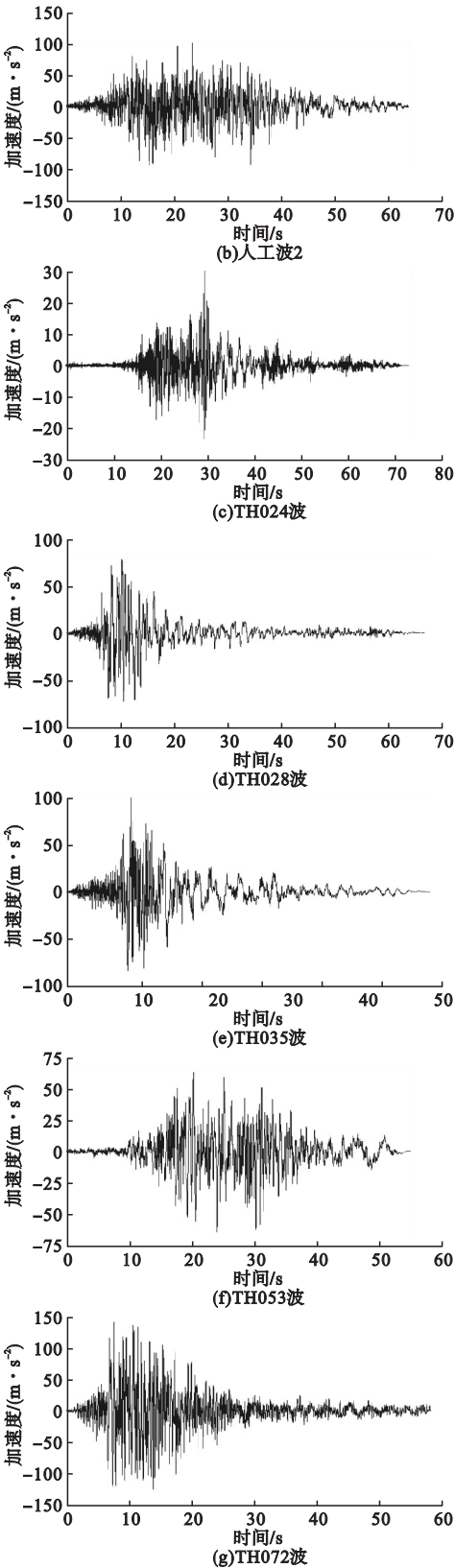
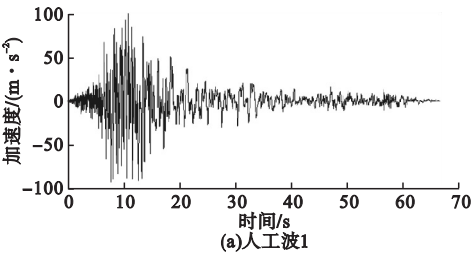


图5 地震波时程曲线

Fig.5 The seismic time history curves



7组地震波的反应谱与规范反应谱的对比见图6。地震波的选取满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)。

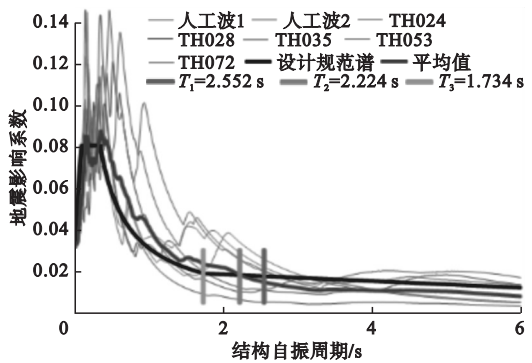


图6 地震波反应谱与规范反应谱的对比

Fig. 6 The comparison of seismic response spectrum and standardized response spectrum

5.4 消能减震结构等效自振特性

对消能减震结构按弹性的方法估算其等效自振特性,阻尼器等效刚度按多遇地震下阻尼器的割线刚度进行计算<sup>[19-20]</sup>。表2为有控结构 and 无控结构自振特性的对比。

表2 有控结构 and 无控结构的自振周期对比

Table 2 The comparison of structural vibration period

振型	无控结构周期/s	有控结构周期/s
1	2.551 8	2.952 4
2	2.224 4	2.632 4
3	1.734 2	1.963 2

5.5 减震指标对比

多遇地震和罕遇地震下有控结构 and 无控结构的基底剪力、层间位移角和倾覆力矩见表3~表5。

表3 有控结构 and 无控结构时程分析平均基底剪力对比

Table 3 The comparison of the average maximum base shear force

结构类型	多遇地震下平均基底剪力/kN		罕遇地震下平均基底剪力/kN	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
无控结构	4 434	3 260	27 874	20 497
有控结构	3 871	2 105	18 632	11 867

表4 有控结构 and 无控结构时程分析平均最大层间位移角对比

Table 4 The comparison of the average maximum inter-story displacement angle

结构类型	多遇地震下平均最大层间位移角/rad <sup>-1</sup>		罕遇地震下平均最大层间位移角/rad <sup>-1</sup>	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
无控结构	3 226	1 735	513	276
有控结构	4 581	3 303	613	326

表5 有控结构 and 无控结构时程分析平均最大倾覆力矩对比

Table 5 The comparison of the average maximum overturning moment

结构类型	多遇地震下平均最大倾覆力矩/(kN·m)		罕遇地震下平均最大倾覆力矩/(kN·m)	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
无控结构	159 848	276 930	1 004 759	276 930
有控结构	76 726	186 416	555 422	186 416

由表3可见,多遇地震下平均基底剪力X方向减小了12.70%,Y方向减小了35.43%;罕遇地震下平均基底剪力X方向减小了33.16%,Y方向减小了42.10%。

由表4可见,多遇地震下平均最大层间

位移角X方向减小了29.58%,Y方向减小了47.47%;罕遇地震下平均最大层间位移角X方向减小了16.31%,Y方向减小了15.34%。

由表5可见,多遇地震下平均最大倾覆

力矩  $X$  方向减小了 52.00%,  $Y$  方向减小了 32.6%; 罕遇地震下平均最大倾覆力矩  $X$  方向减小了 44.72%,  $Y$  方向减小了 32.68%。

5.6 能量输入和耗散分析

阻尼器在多遇地震及罕遇地震下的典型滞回曲线如图 7 和图 8 所示。

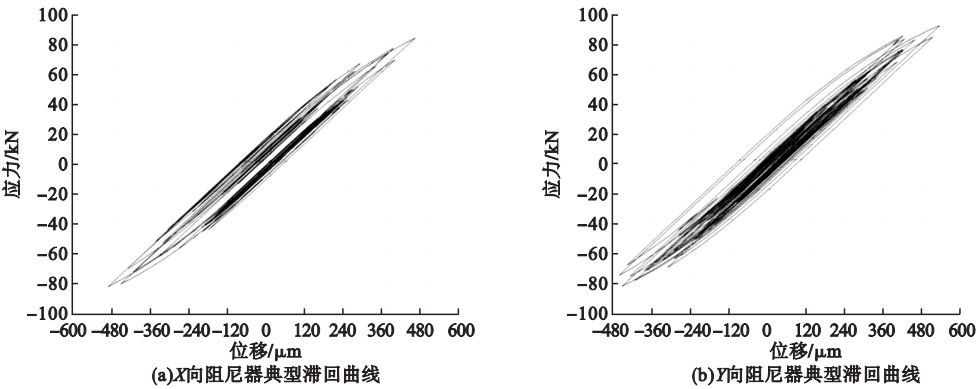


图 7 多遇地震阻尼器的典型滞回曲线

Fig. 7 Typical hysteretic curve of the dampers during the frequent earthquake

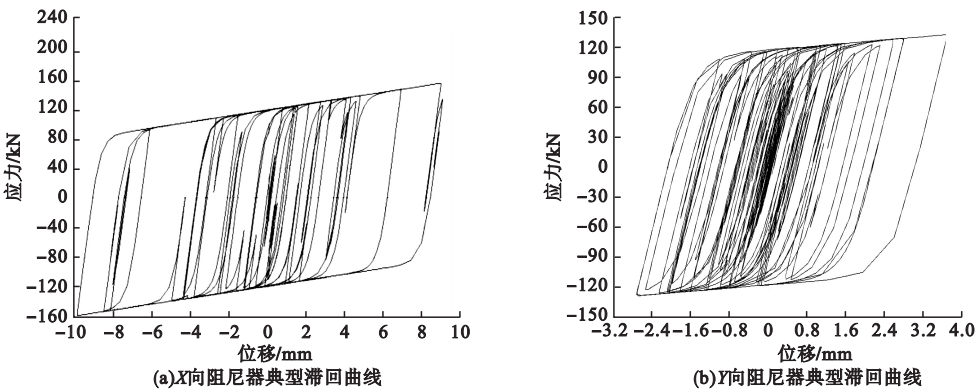


图 8 罕遇地震阻尼器的典型滞回曲线

Fig. 8 Typical hysteretic curve of the dampers during the rare earthquake

由图可见,阻尼器在多遇地震下的滞回曲线呈条状,尚未屈服或仅发生极小屈服;在罕遇地震下滞回曲线饱满,极大的耗散了地震能量。

5.7 等效线性化的分析

5.7.1 等效线性化模型

在罕遇地震作用下,笔者采用 YJK、PK-PM 等常规软件,按照反应谱法对构件进行内力、配筋计算.主体结构处于弹塑性状态,阻尼器处于非线性工作状态,故此将阻尼器进行等效线性化,并采用附加有效阻尼比和有效刚度的振型分解反应谱法来进行计算。

消能减震结构的总刚度为结构刚度和消能部件有效刚度之和,因此,消能减震结构的总阻尼比应为结构阻尼比与消能部件附加给结构的有效阻尼比之和。

5.7.2 阻尼器的有效刚度

在相应水平地震作用下,取阻尼器的有效刚度,阻尼器恢复力滞回环在阻尼器竖向剪切位移时,其割线刚度示意图如图 9 所示.图中,  $F_y$  为阻尼器的屈服力;  $K_1$  为阻尼器的屈服前刚度;  $K_e$  为阻尼器的等效刚度;  $K_y$  为阻尼器的屈服后刚度;  $\Delta u$  为阻尼器的实际位移。

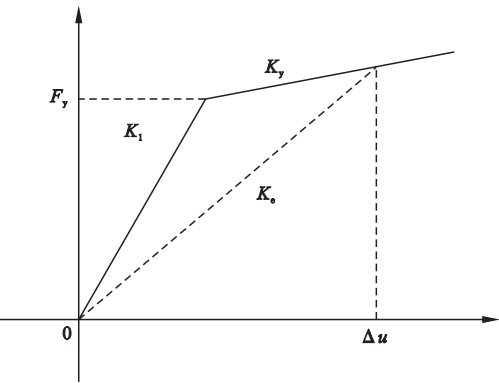


图9 阻尼器等效刚度示意图

Fig. 9 The equivalent stiffness of damper

5.7.3 阻尼器的有效附加阻尼比

消能部件附加给结构的有效阻尼比可<sup>[17]</sup>表示为

ξ<sub>a</sub> = ∑<sub>j</sub> W<sub>cj</sub> / (4πW<sub>s</sub>). (3)

式中:W<sub>cj</sub>为第j个阻尼器在结构预期层间位移;Δu<sub>j</sub>为阻尼器往复循环一周所消耗的能量;W<sub>s</sub>为消能减震建筑在水平地震作用下的总应变能.

在不考虑扭转影响时,消能减震结构在水平地震作用下的总应变能为

W<sub>s</sub> = (1/2) ∑ F<sub>i</sub>u<sub>i</sub>. (4)

式中:F<sub>i</sub>为质点i的水平地震作用标准值;u<sub>i</sub>为质点i对应于水平地震作用标准值的位移.

位移型阻尼器在水平地震作用下往复循环一周所消耗的能量为

W<sub>cj</sub> = 4(kf<sub>y</sub> - α<sub>s</sub>kx<sub>y</sub>)(x<sub>m</sub> - x<sub>y</sub>)W<sub>cj</sub> = 4f<sub>y</sub>x<sub>y</sub>(1 - α<sub>s</sub>)(μ - 1). (5)

罕遇地震地震下结构附加阻尼比如表6所示.

表6 罕遇地震地震下结构附加阻尼比  
Table 6 The additional damping ratio during the rare earthquake

方向	W <sub>c</sub> / (kN·mm)	W <sub>s</sub> / (kN·mm)	ξ <sub>a</sub> / %
X	607 250	134 139 000	0.452 7
Y	638 520	151 992 200	0.420 1

5.8 消能减震结构的地震影响系数

《建筑抗震设计规范》(JGJ297—2013)中以地震影响系数作为设计参数,并以图10的地震系数曲线(经平滑处理和适当调整)作为设计依据的反应谱.

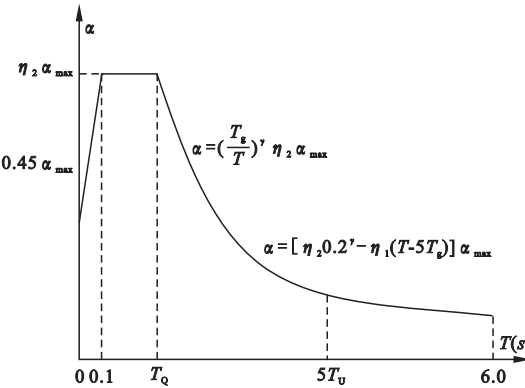


图10 地震影响系数曲线

Fig. 10 The seismic influence coefficient curves

图中:α(T)为地震影响系数,表示地震作用与体系重力之比;α<sub>max</sub>为地震影响系数最大值,本设计中多遇地震取0.08,罕遇地震取0.50;γ为衰减指数,γ = 0.9 + (0.05 - ξ) / (0.3 + 6ξ);η<sub>1</sub>为直线下降段的下降斜率调整系数,η<sub>1</sub> = 0.02 + (0.05 - ξ) / (4 + 32ξ);η<sub>2</sub>为阻尼调整系数,η<sub>2</sub> = 1 + (0.05 - ξ) / (0.08 + 1.6ξ).

阻尼器增大的结构附加阻尼比通过影响衰减指数、直线下降段的下降斜率调整系数以及阻尼调整系数来影响水平地震影响系数.表7为多遇地震和罕遇地震下地震影响系数对比.

表7 地震影响系数对比

Table 7 The comparison of the earthquake affecting coefficient

结构类型	多遇地震	罕遇地震
无控结构	0.017 99	0.112 48
有控结构	0.016 82	0.103 76

由表7可见,阻尼器的布设有效地减小了地震影响系数,且罕遇地震下的降低比例



高于多遇地震.多遇地震下地震影响系数减小了6.95%,罕遇地震下地震影响系数减小了8.40%.

6 技术经济性分析

《建筑抗震设计规范》(JGJ297—2013)指出,当消能减震结构的抗震性能明显提高时,主体结构的抗震构造要求可适当降低.为展现降低结构地震反应后混凝土和钢筋等材料用量的变化,将前述模型转入PKPM中进行多遇地震下的配筋计算,并加入连接单元以展现消能器的作用.

根据初步的工程量测算,在工程采用减震技术与非减震技术设计的主材用量及造价如表8所示.上述经济性分析是在不考虑截面变小的情况下进行的,实际上随着设防烈度的降低构件截面会变小,造价会大幅度降低.建议设计人员可根据采用消能减震措施以后的内力适当地对原有设计进行优化,之后进行下一轮消能方案的最终确定.

表8 钢筋用量比较  
Table 8 The comparison of the amount of reinforcements

结构类型	钢筋用量/t	单位造价/(元·t <sup>-1</sup> )	总造价/元
无控结构	799.218	4 000	3 196 872
有控结构	716.859	4 000	2 867 436

由表可见,消能减震结构降低了总配筋量,节约了经济成本32.95万元.本工程共使用403套阻尼器,按每套阻尼器1万元计算,共计403万元.使用阻尼器后共计增加了370.05万元.建筑占地面积751.80 m<sup>2</sup>,总建筑面积25 744 m<sup>2</sup>,每平方米增加造价约143元,造价虽有增加,但换来的是建筑物抗震性能大大增加,在地震来临时可保证建筑物及内部人员及设备的安全,使其功能不致中断,以较小的投资增加来保证建筑物的安全及功能.

7 结 论

(1)设置位移型金属连梁阻尼器后,有

效地降低了结构基底剪力、层间位移角和倾覆力矩等指标,使结构具有较好的抗震性能.

(2)设置连梁金属阻尼器后,连梁剪力得到合理控制,解决了小震作用下非减震结构的大量钢筋混凝土连梁剪压比超限的问题,使连梁具有足够的承载力和延性.

(3)采用反应谱法进行结构内力配筋验算时,等效线性化计算模型的附加阻尼比可取0.5%,计算结果表明消能减震结构的配筋量相对非消能减震结构降低了约10%.

(4)阻尼器的设置虽然导致造价略有增加,但可显著的降低结构各项指标在地震作用下的反应,基底剪力可减小13%~42%,最大层间位移角可减小15%~47%,倾覆力矩可减小32%~52%,保障了人民的人身安全和财产安全.

综上所述,减震技术为人们减轻地震灾害提供了更有效、更合理的新途径.有效延长了结构自振周期,增大了结构的阻尼比,降低了结构对应的水平地震影响系数,提升了建筑物的抗震性能,因此无论从安全上还是经济上都是有利的.

参考文献

[1] TENG J, BOTAO M A, WEIHUA L I, et al. Pseudo-static test for coupling beam damper of coupled shear wall structure [J]. Journal of building structures, 2010, 31 (12): 92-100.

[2] DENG F, WANG T, SHI W. Cyclic test on seismic behavior of energy-dissipative coupling beams with dampers [J]. China civil engineering journal, 2016, 49: 96-100.

[3] ZHANG Z, OU J, LI D, et al. Optimization design of coupling beam metal damper in shear wall structures [J]. Applied sciences, 2017, 7 (2): 137.

[4] ROSTOMYAN E V. Dissipative instability under weak beam - plasma coupling in finite magnetic field [J]. Journal of plasma physics, 2012, 78 (5): 531-535.

[5] ZHOU D R, XU G S, WU B, et al. Application of equivalent force control method in pseudo-dynamic substructure tests of coupling beam damper [J]. Journal of vibration & shock, 2011, 30 (8): 72-76.

[6] TENG J, LI Z H, GAO C, et al. Design and application of steel plate damper composite cou-

- pling beam made of energy dissipating module [J]. Earthquake engineering & engineering dynamics, 2014, 34(2): 187-194.
- [7] TENG J, JING L I, WANG L S, et al. Energy dissipation analysis and application of high-rise structures based on coupling beam damper[J]. Journal of disaster prevention & mitigation engineering, 2014, 34(3): 302-307.
- [8] ZHANG Z, OU J P, HE Z. Optimization design for coupling beam dampers of shear walls[J]. Applied mechanics & materials, 2014, 444/445: 115-121.
- [9] MORESCHI L M, SINGH M P. Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2003, 32: 1291-1311.
- [10] GÜRGÖZE M, MÜLLER P C. Optimal positioning of dampers in multi-body systems[J]. Journal of sound & vibration, 1992, 158(3): 517-530.
- [11] 潘鹏, 叶列平, 钱稼茹, 等. 建筑结构消能减震设计与案例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.  
(PAN Peng, YE Lieping, QIAN Jiaru, et al. Seismic design of building structures equipped with energy dissipation devices [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2014.)
- [12] 郭迅, 王涛, 郑志华. 模块化钢滞变阻尼器的使用方法: CN 102433942 A[P]. 2011-09-26.  
(GUO Xun, WANG Tao, ZHENG Zhihua. The use of modular steel lag variable damper: CN 102433942 A[P]. 2011-09-26.)
- [13] 程志辉. 剪力墙结构位移型阻尼器有效位置的初步探讨[J]. 建筑结构, 42(5): 508-510  
(CHENG Zhihui. Preliminary discuss about effective positions of displacement-type dampers in shear wall structures [J]. Building structure, 42(5): 508-510.)
- [14] 潘超, 翁大根. 连梁内设置竖向变形阻尼器的耗能剪力墙体系减震分析与设计[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 39-46.  
(PAN Chao, WENG Dagen. Seismic analysis and design of damping controlled coupled shear wall with vertical dampers in coupling beams [J]. Journal of building structures, 2012, 33(10): 39-46.)
- [15] 孙柏涛, 杨康, 王明振, 等. 钢筋混凝土剪力墙结构连梁阻尼器性能参数优化方法研究 [J]. 地震工程与工程震动, 2016, 36(4): 1-8.  
(SUN Baitao, YANG Kang, WANG Mingzhen, et al. Study on an optimization method for the parameters of coupling beam damper used on reinforced concrete shear wall structure [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2016, 36(4): 1-8.)
- [16] 李冬晗, 张沛洲, 欧进萍. 双肢剪力墙连梁截断式剪切型金属阻尼器抗震设计与分析[J]. 地震工程与工程震动, 2015, 35(6): 177-185.  
(LI Donghan, ZHANG Peizhou, OU Jinping. Seismic design and analysis of central shear link for coupling beam in reinforced concrete shear walls [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2015, 35(6): 177-185.)
- [17] 景铭, 戴君武, 刘永彬. 高层剪力墙结构消能连梁设计案例分析及几个问题的讨论[J]. 地震工程与工程振动, 2018(3): 79-89.  
(JING Ming, DAI Junwu, LIU Yongbin. Case analysis and discussion on the designing of energy-dissipative coupling beams in high-rise shear wall structures [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2018(3): 79-89.)
- [18] 蒋欢军, 胡玲玲, 应勇. 钢筋混凝土剪力墙结构层间位移角与构件变形的关系研究[J]. 结构工程师, 2011, 27(6): 26-33.  
(JIANG Huanjun, HU Lingling, YING Yong. Study on relationship between story drift and element deformation for RC shear wall structures [J]. Structural engineers, 2011, 27(6): 26-33.)
- [19] 邓付元, 王涛, 施唯. 带阻尼器消能连梁抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016(增刊1): 96-100.  
(DENG Fuyuan, WANG Tao, SHI Wei. Experimental study on anti-seismic performance of a beam with damper energy dissipation joint [J]. Journal of civil engineering, 2016(S1): 96-100.)
- [20] 施唯, 王涛, 孔子昂, 等. 消能连梁子结构试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014(增刊1): 743-749.  
(SHI Wei, WANG Tao, KONG Zi'ang, et al. Experimental study of energy dissipation coupled beam structure [J]. Seismic engineering and engineering vibration, 2014(S1): 743-749.)