

基于耗能减震结构耗能装置的优化设置的研究

熊仲明^{1,2}, 王佳¹, 郭瑜¹

(1 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘要: 在建筑物中设置耗能减震装置, 已在抗震领域研究多年, 而阻尼安装位置的优化确是摩擦阻尼器应用中面临的主要问题之一。相同数量的阻尼器, 不同的布置位置, 将会对主体结构的消能减震作用产生较大影响。对此, 本文以某八层框架为例, 通过 ANSYS 有限元软件对结构进行八度多遇及罕遇地震作用分析, 得出了结构在无阻尼、循环优化法及遗传算法再优化三种情况下结构的地震响应。计算结果表明, 安装摩擦阻尼器的消能减震结构抗震性能明显提高; 在摩擦阻尼器数量一定的前提下, 通过遗传算法对阻尼器位置布置的进一步优化有利于减小结构地震响应, 提高结构抗震性能。

关键词: 摩擦耗能减震装置; 摩擦阻尼器; 结构优化设计; 遗传算法

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)02-0166-06

被动控制是指考虑振动的一般特性, 为隔离、减少或消耗输入结构内的振动能量, 事先在结构内某部位安装经过调整的弹簧、阻尼器等装置, 使结构难以发生共振并减少主体结构震动反应的一种控制方法^[1]。通常被动控制不需要外部提供能源, 其控制力是控制装置随着结构一起振动变形, 因装置自身的运动而被动产生的。

在被动控制结构中, 摩擦耗能减震装置由于其显著的特性和优点, 目前越来越多的被广泛采用^[2-6]。但摩擦耗能减震装置在应用中目前仍存在着两大需要解决的问题, 一是阻尼器的几何参数的选择; 二是阻尼器安装位置的确定。

通常相同数量的阻尼器, 布置位置是否优化, 将会对主体结构的消能减震作用产生较大影响。因此, 本文运用循环法和遗传算法的优化方法对某八层框架结构装有被动控制的摩擦阻尼器进行计算, 采用 EL-Centro 波和天津波对其结构进行地震响应分析对比, 得出了结构在无阻尼、循环优化法及遗传算法再优化三种情况下结构的地震响应, 取得了较有意义的研究成果。

1 耗能器的选择、数量确定及布置原则

1.1 耗能器的选择

目前研发的耗能器从作用机理上分为速度相关型、位移相关型和复合型耗能器。速度相关型耗能器(包括粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器)是利用与速度有关的粘性抵抗作用, 从小振幅到大振幅的变化来获得衰减力, 其耗能能力取决于耗能器两端相对变形速度的大小; 位移相关型耗能器(包括摩擦耗能器、金属耗能器等)是利用滞回变形消耗能量, 其耗能能力仅与耗能器两端相对位移的大小有关; 而复合型耗能器是利用两种或两种以上的耗能元件或耗能机理耗散能量, 这类耗能器计算模型较为复杂, 若无特别突出的优越性, 一般不宜采用。

通常耗能器的型号参数选用包括最大阻尼力、最大行程、工作效率等内容。对于相应的极限状态, 必须确保耗能构件具有相应的安全富余度, 在可动范围内必须避免破坏, 所有耗能器的最大行程应大于所

收稿日期: 2010-03-16 修改稿日期: 2011-03-12

基金项目: 陕西省教育厅专项科研基金(09JK550); 江苏省结构重点实验室开放基金(ZD0803); 西安市科技攻关课题(GG04051)

作者简介: 熊仲明(1966-), 男, 湖北麻城人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混凝土结构的基本理论、工程抗震、减震以及高层建筑桩土共同作用等。

在层最大位移的 130%。其中, 速度相关型耗能器还要有最大速度大于所在层最大速度的 130%。另外, 为使耗能器不会对结构造成不利影响, 保护支撑系统和连接点不会因为阻尼力太大而先于结构破坏, 要控制大振作用下耗能器的阻尼力。

1.2 耗能器的数量的确定

耗能器的数量和主要的性能特征参数与通常与地震作用有关。在耗能器主要性能特征参数确定的情况下, 可以用能量法初步确定所需要的数量, 最后通过时程分析进一步验证。在实际工程设计中, 通常认为地震能量 E_{in} 全部由耗能器耗散和吸收, 即:

$$E_{in} \leq E_A \tag{1}$$

式(1)中: 地震能量 E_{in} 可根据地震能量反应谱确定; 耗能器所消耗的能量 E_A 可由耗能器的滞回环的面积求出, 其近似表达式为:

$$E_A = n \psi m E_{di} \tag{2}$$

式(2)中, E_{di} 表示单个耗能器循环一周所耗散的能量, 等于滞回曲线包围的面积, 可以根据耗能器的恢复力模型进行计算; m 为耗能器的循环次数, 一般可达 200~600 次; ψ 为耗能器的工作系数, 一般可取 0.4~0.6; n 为耗能器的总数。

结合公式(1), (2)即可以初步确定耗能器的数量。

1.3 耗能器的布置原则

在结构平面上, 耗能器的布置应使结构的扭转效应尽量减小, 确切地说, 应布置在结构的外缘。一般在结构的纵、横方向都要布置耗能器且尽量组成 L 形、工字形、口字形, 以便增强结构的抗侧刚度, 尽量使结构的质量中心与刚度中心重合在结构立面上。另外, 耗能器应放在层间剪切位移较大的部位, 如框架结构的下部楼层, 尽量采用对角线连接布置。

对于给定的结构, 在耗能器数目一定的条件下, 可根据可控度的概念, 采用最优放置顺序逼近法来确定耗能支撑的最优布置方案, 将层间变形的均方值定义为最优位置指数。具体方法是可见文献[1]。

2 耗能器布置位置优化思路

阻尼器的优化设置是阻尼器减振设计过程中一个重要的环节, 它主要包含两方面的问题: 一是位置优化合理的目标函数; 二是实现目标函数的方法。很多国内外学着已经提出很多优化方法, 如粘弹性阻尼结构的递归神经网络优化方法^[7]。本文使用的优化方法如下:

2.1 循环法优化

循环法是以层间位移为控制函数, 每次在层间位移较大的楼层安装摩擦阻尼器, 然后采用时程分析计算结构的地震反应, 判断此时层间位移角是否满足规范要求, 如果不满足则要修改结构刚度和阻尼矩阵, 再进行计算和分析, 直至最大层间位移满足规范要求:

$$|u_{max}| \leq [u] \tag{3}$$

具体的优化流程见图 1。

2.2 遗传算法优化

遗传算法^[8]是模拟自然界生物进化过程

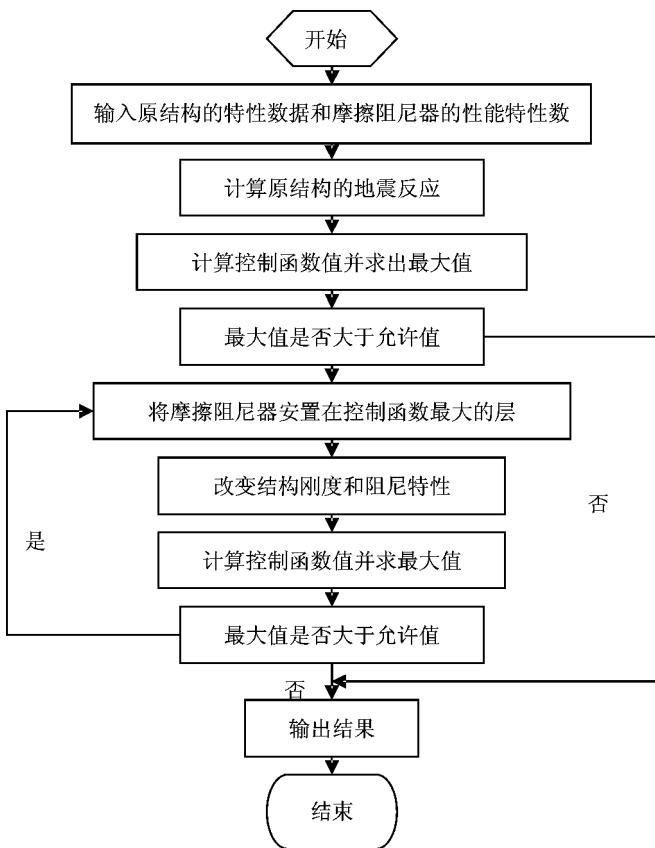


图 1 循环法优化设计流程图

Fig. 1 Optimization flow chart by cycled optimum method

与机制求解极值问题的一类自组织、自适应人工智能技术,它是由美国 Michigan 大学 J. Holland 教授于 1975 年首先提出来的.遗传算法求解问题的一般步骤为:①、随机给定一组初始解;②、评价当前这组解的性能;③、根据②的评价结果,从当前解中选择一定数量的解作为基因操作的对象;④、对所选择的解进行基因操作(杂交(交叉)、突变(变异)),得到一组新的解;⑤、返回到②,对该组新的解进行评价;⑥、若当前解满足要求或进化过程达到一定的要求,计算结果,否则转向③继续进行.

本文对钢筋混凝土框架结构中的耗能器的位置采用 Matlab 遗传算法工具箱^[9]进行优化.应用循环法优化出来的摩擦阻尼器数量,将其均匀地分布在原结构(未安装阻尼装置的结构)中,再以层间位移为优化的目标函数,运用遗传算法进行位置的优化.优化模型为:

求

$$X=(x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n)^T$$

(4)

$$\min f(X)$$

s. t.
$$g_j(X) \leqslant 0 \quad (j=1, 2, \cdots, m)$$

$$h_k(X)=0 \quad (k=1, 2, \cdots, p)$$

式中: X 称为设计变量, x_i 为第 i 个设计参数; $f(X)$ 称为目标函数; $g_j(X) \leqslant 0$ 称为不等式约束条件, $h_k(X)=0$ 称为等式约束条件.

具体的优化流程见图 2.

3 计算实例

3.1 工程概况及模型的建立

本工程为 8 层钢筋混凝土框架结构,见图 3,1 层层高 5.2 m,2~8 层层高为 3.6 m,建筑结构总高为 30.4 m.柱截面为 800 mm×800 mm,梁 KL1 截面为 350 mm×700 mm,梁 KL2 截面为 250 mm×500 mm.梁、柱混凝土分别采用 C30 和 C40,弹性模量分别为 $3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 和 $3.25 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,泊松比为 0.2,混凝土容重为 2500 kg/m^3 ,地震设防烈度为 8 度,Ⅱ类场地土.

根据 1.1 节介绍的阻尼器的选择原则,再根据结构的位移、受力条件来确定耗能器的型号.本工程采用双剪 Pall 型摩擦耗能器,其装置的滑动荷载为 300 kN,最大滑动位移为 8 cm,其恢复力模型采用理想刚塑性模型.应用 ANSYS 有限元程序对结构在 8 度多遇地震和罕遇地震进行分析.

本文模型选用 ANSYS 三维模型,结构的梁、柱单用均选取 beam4 单元,阻尼器选用 combine14 单元进行模拟,等效刚度 $K_d=1.72 \times 10^7 \text{ N/m}$,等效阻尼 $C_d=5.01 \times 10^7 \text{ N/m}$.通过约束六个方向的自由度实现模型下部与地面刚接.

3.2 结果分析

本文采用经循环设置方法,根据图 1 的设计流程确定了结构的摩擦阻尼器设置数量和位置,具体位置和数量见图 4 所示;根据图 2 的设计流程,运用遗传算法对结构进行进一步优化,具体布置方式见图 5 所示.

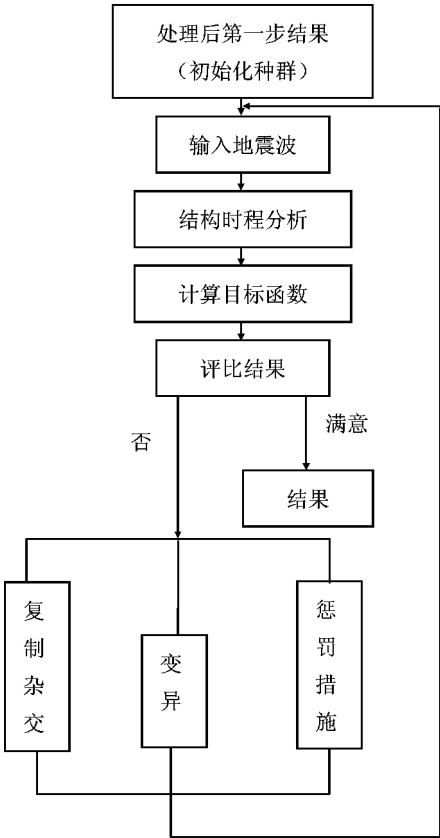


图 2 遗传法优化设计流程图
Fig. 2 Optimization flow chart by GA method

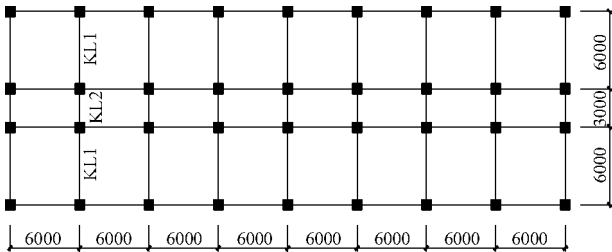


图 3 结构平面布置图
Fig. 3 Structure floor plan

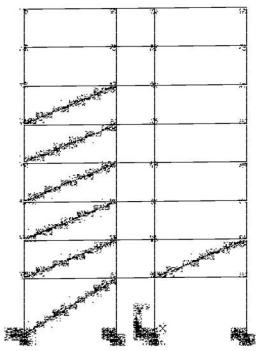


图 4 循环法优化阻尼器布置图

Fig. 4 Damper layout by cyclic optimum method

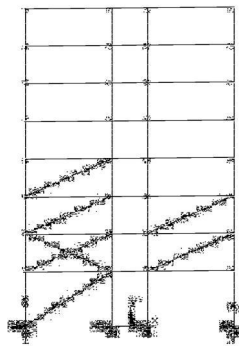


图 5 遗传法再优化阻尼器布置图

Fig. 5 Damper layout by GA method

本文分别采用 10s 记录 EL-Centro 波和 20s 记录的天津波作为输入的地震波, 以加速度的形式施加, 并将这两种波的最大加速度分别调整到 70gal 和 400gal, 以便满足 II 类场地土的要求. 地震波采用横向输入的方式分别对纯框架结构、循环法设置摩擦阻尼器结构和遗传算法再优化结构进行分析, 得出了三种模型各楼层的位移反应, 见图 6~图 9 所示.

从图 6~图 9 可以看出, 在 EI -Centro 波和天津波两种地震波的作用下, 摩擦阻尼结构均发挥了良好的消能减震效果. 无论是在 8 度多遇地震强度作用下还是在 8 度罕遇地震强度作用下, 对于选择的对比参数中顶层的位移时程, 摩擦阻尼结构都比原始结构要减 40 %左右. 说明摩擦阻尼器无论是在多遇地震强度下还是在罕遇地震强度作用下, 都能够很好的发挥消能减震的作用.

从图 6~图 9 可以看出, 结构在进行遗传算法再优化后, 比优化前结构在多遇的地震强度作用下, 顶层的最大弹性位移要降低约 17%. 罕遇地震强度作用下, 顶层的最大弹性位移要降低约 10%. 而且, 层间侧移也有了一定程度上的减小, 其中, 2、3、4 层的降低最为明显. 遗传算法优化后各层的最大层间相对位移也较为平均, 这样更有利于充分发挥结构各层所有结构构件的抗震性能. 由上可见, 布置相同数量的阻尼器, 应用遗传算法再次优化后, 结构的地震响应又有所降低, 更有利于结构性能的发挥. 因此, 对于摩擦阻尼器位置的优化设计是有必要的.

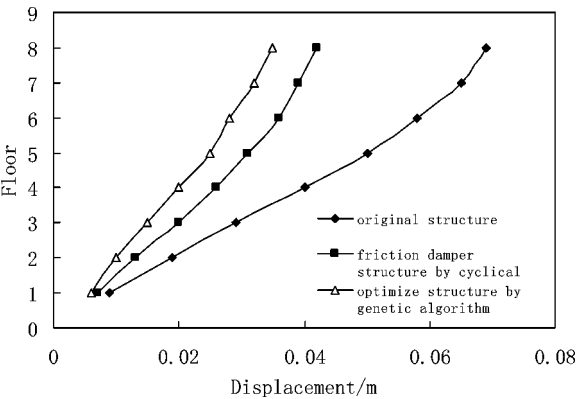


图 6 8 度 EL-Centro 波多遇地震下三种模型位移对比图

Fig. 6 Displacement of three models in comparison chart in 8-degree multi-in earthquake under the action of the event in EL-Centro wave

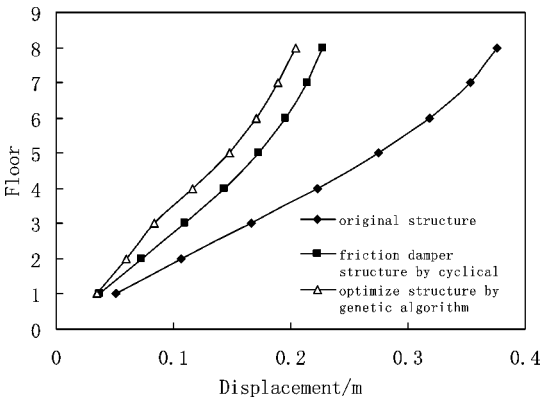


图 7 8 度 EL-Centro 波罕遇地震下三种模型位移对比图

Fig. 7 Displacement of three models in comparison chart in 8-degree rare earthquake under the action of the event in EL-Centro wave

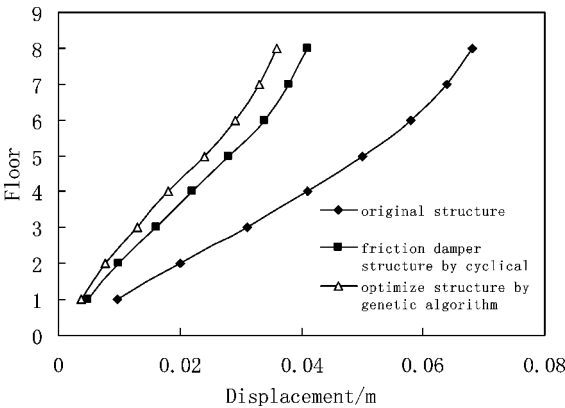


图 8 8 度天津波多遇地震下三种模型位移对比图

Fig. 8 Displacement of three models in comparison chart in 8-degree Multi-in earthquake under the action of the event in Tianjin wave

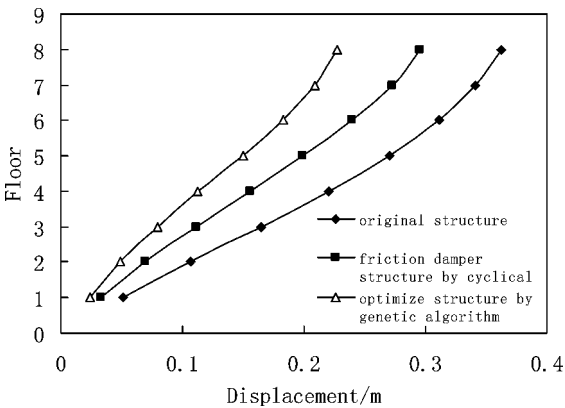


图 9 8 度天津波罕遇地震下三种模型位移对比图

Fig. 9 Displacement of three models in comparison chart in 8-degree rare earthquake under the action of the event in Tianjin wave

4 结 论

本文采用三种不同的方法对同一结构进行了 8 度多遇及罕遇地震作用下的时程分析,得到如下主要结论:

(1) 本文采用循环布置法有效而且直观的确定了结构所需加设阻尼器的总数量,并给出了一定的布置形式.利用遗传算法对相同阻尼器数量的减震结构进行优化,使得结构在相同的阻尼器数量下,有更好的减震效果.这种将循环布置法与遗传算法相结合的优化思路,对于耗能减震结构的阻尼器优化有良好的效果.

(2) 计算结果表明,结构在进行遗传算法再优化后,比优化前结构在多遇的地震强度作用下,顶层的最大弹性位移要降低约 17%.罕遇地震强度作用下,顶层的最大弹性位移要降低约 10%.

(3) 计算结果表明,本文采用了 EI-Centro 波和天津波对结构进行阻尼器的优化分析,其优化结果基本一致,从而说明了不同优化方法对地震波有较好的适应性,避免了出现不同地震波优化结构大相径庭的现象.

(4) 计算结果表明,在地震作用下,摩擦阻尼器对结构的减震控制有很明显的效果.安装有摩擦阻尼器的结构在地震过程中,总体地震动力响应减小了 40%以上,大大优化了结构在地震作用下的抗震性能,提高了结构的安全储备.

(5) 计算结果表明,在多遇地震作用下,摩擦阻尼器能够正常工作,达到“小震不坏,中震可修”的设防标准;同时在罕遇地震作用下,摩擦阻尼器仍然能够正常工作,使结构不仅能达到“大震不倒”的设防标准,而且也达到了“大震可修”的标准.

参考文献 References

[1] 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M] . 北京: 科学出版社, 2003.
OU Jin-ping. Structural vibration control—Active and semi-active and intelligent control[M] . Beijing: Science Press 2003.

[2] 周福霖. 工程结构减震控制[M] . 北京: 地震出版社, 1997.
ZHOU Fu-lin. Damping control of engineering structures[M] . Beijing: Earthquake Press, 1997.

[3] PALL A S, VERGANELAKIS V, MARSH C. Friction-Dampers for Seismic Control of Concordia University Library Building[C] . Proc. of 5th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, 1987.

- [4] SAHAI R. Performance Based Design of 4-story Moscone Convention Center Expansion Using Steel Couple Girder Moment Resisting Frame and Friction Dampers[C] // Proceedings, SEAOC Annual Convention, Santa Barbara, California, 2000.
- [5] 欧进萍, 邹向阳. 振戎中学食堂楼耗能减震分析与设计(I) — 反应谱法[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1), 109-114.
OU Jin-ping, ZOU Xiang-yang. Seismic analysis and design of energy of Zhenrong high school Dining-room(I) — Response spectrum method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1), 109-114.
- [6] NIELSEN L O, MUALLA I H, IWAI Y. Seismic Isolation with a New Friction-Viscoelastic Damping System[C] // Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, 2004.
- [7] 周建中, 赵鸿铁, 薛建阳. 黏弹性阻尼结构的递归神经网络优化[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37(1): 35-39.
ZHOU Jian-zhong, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang. Optimum of the viscoelastic structure based on recurrent neural network[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2005, 37(1): 35-39.
- [8] 冯 瑛. 网架结构优化设计分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
FENG Ying. Optimization Design and Analysis of network structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [9] 雷英杰, 张善文. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen. Matlab Genetic Algorithm Toolbox and Its Application[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2005.

Research on optimization setting based on passive energy dissipation structural device

XIONG Zhong-ming^{1,2}, WANG Jia¹, GUO Yu¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Setting energy dissipator in the building has been in research for many years in the seismic field. One of the friction damper application problems is the damper setting place. There is great influence on energy dissipation in structure whether the damper setting place is optimized under the same number of the dampers. Eight degrees multi-in earthquake and rare earthquake dynamic time history analysis was done in an eight-floor frame by ANSYS finite element software. Three conditions of structural dynamic response are obtained: no friction dampers, friction damper optimized by cyded optimum method, and friction under GA method. The results show that the structure, with friction damper installed, can markedly improve the seismic ability, and the optimization of friction damper installation place will be greatly helpful for reducing the structural dynamic response as the number of friction damper is determined.

Key words: friction energy; dissipation device; friction damper; optimization design; genetic algorithm