

基于生物启发的新型隔震系统设计 与可应用性研究

施志国,单伽铿,张全伍,施卫星

(同济大学土木工程学院结构工程与防灾研究所,上海 200092)

摘要 目的 对典型框架结构进行隔震设计,验证基于生物启发的新型被动基础(BIO)隔震系统在工程中的应用.方法 基于ETABS数值模型,利用ETABS软件中自带的Multi-Linear Elastic单元和Plastic(Wen)单元组合形成新型BIO模拟单元.并与传统线性隔震进行对比.结果 组合BIO单元能够较好地模拟BIO元件的力学行为和耗能特征.隔震结构的周期延长为未隔震结构的3.7倍左右,水平减震系数可达到0.29.BIO隔震系统在罕遇地震下支座最大位移为219 mm,小于支座位移限值350 mm.对于基底剪力的改善比例在10%~25%,对于隔震层位移的改善比例在10%~25%.BIO隔震系统能够较好地满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)的要求.结论 BIO隔震系统与传统线性隔震系统相比,具有更好的耗能能力,能够有效地降低基底剪力,同时减小隔震层位移.

关键词 生物启发;隔震结构;时程分析;ETABS软件

中图分类号 TU318.1 文献标志码 A

Design and Feasibility Study on Bio-inspired Isolation System with Case Study

SHI Zhiguo, SHAN Jiazeng, ZHANG Quanwu, SHI Weixing

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai, China, 200092)

Abstract: To validate the feasibility of innovative base isolation system (BIO isolation system), BIO isolation system was adopted in a frame structure in ETABS software. The BIO component can be assembled with Multi-Linear Elastic element and Plastic (Wen) element which are software-provided. The results of BIO isolation system are compared with linear isolation system. Time-history result indicates that assembled BIO component is able to simulate the BIO mechanical behavior and energy dispersion mechanism well. The period of isolated-structure is about 3.7 times that of original structure, and the earthquake-reduction coefficient is about 0.29. Maximum base drift of BIO isolation in severe earthquake is 219 mm, which is within standard limits (350 mm).

收稿日期:2017-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51408435);中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介:施志国(1992—),男,博士研究生,主要从事新型隔震技术研究.

The improvement of base shear force is about 10% ~ 25%, and the improvement of base drift is about 10% ~ 25%. BIO isolation can meet the design requirement in Earthquake resistant design code (GB50011-2010). Furthermore, compared with the traditional linear isolation, BIO isolation system has better energy dissipation capacity and can decrease the base shear and base drift that is within standard limits.

Key words: Bio-inspired, isolated structure, time-history analysis, ETABS software

基础隔震结构体系通过设置柔性的隔震层,将结构分为上部结构、隔震层和下部结构三部分,地震能量经由下部结构传到隔震层,由隔震层的隔震装置吸收并消耗主要地震能量后,仅有少部分能量传到上部结构^[1-4].其实质是通过降低结构刚度,延长结构自振周期来降低结构的地震反应,确保上部结构在大地震时仍可以处于弹性状态,或保持在弹塑性变形状态的初期状态^[5-7].经历多次大地震的检验,证实了基础隔震体系是一种理想的减轻地震灾害的结构体系,它在地震中表现出优于传统抗震体系的抗震能力^[8-13].传统的被动隔震支座在遭遇强烈地震特别是近断层地震时容易变形过大,而导致隔震层破坏^[14-18].单纯地增加被动式阻尼器来减小隔震层位移,又将一定程度上放大上部结构的地震响应,容易导致建筑结构和非结构性破坏^[19].为解决隔震层变形与上部结构响应之间的矛盾,基于鲍鱼壳“弱键和隐藏长度”耗能机制的启发^[20],CHEN Xi等^[21]提出一种新型的被动基础(BIO)隔震系统,克服了传统隔震系统的无法同时优化平衡隔震层位移和上部结构响应的弊端.笔者在通用有限元软件 ETABS 中模拟 BIO 隔震系统,对钢筋混凝土框架结构进行隔震设计,时程分析表明 BIO 隔震系统可以有效地降低上部结构响应,同时控制隔震层位移. BIO 系统与传统线性隔震系统相比具有更好的耗能能力.

1 BIO 隔震系统

BIO 隔震系统由传统的线性隔震支座与具有“弱键和隐藏长度”性能的被动耗能元

件组成.其简化的力学模型如图 1 所示.

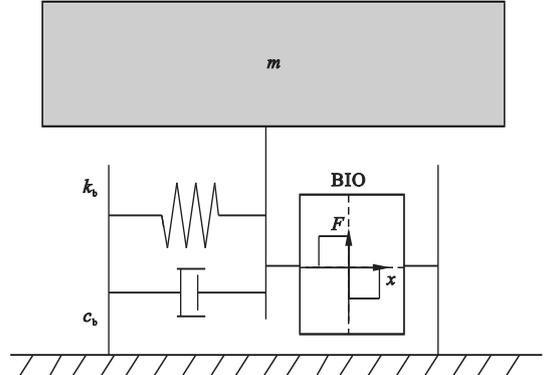


图 1 基于生物启发的隔震系统的力学模型

Fig. 1 Simple mechanical model of the bio-inspired isolator

隔震系统的恢复力为

$$f_{\text{BIO}}(x, \dot{x}) = k_b x + c_b \dot{x} + F_{\text{BIO}}. \quad (1)$$

式中: x 和 \dot{x} 分别为隔震系统的相对位移及速度响应; k_b 和 c_b 分别为隔震支座的刚度和黏滞阻尼系数; F_{BIO} 为模拟鲍鱼壳力学性能的耗能元件提供的作用力,其分段函数表达式为

$$F_{\text{BIO}} = \begin{cases} -f_{\text{max}}, & x \geq 0, \dot{x} \leq 0; \\ f_{\text{max}}, & x \leq 0, \dot{x} \geq 0; \\ 0, & x \cdot \dot{x} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{max} 是“弱键和隐藏长度”力学机制中的最大作用力.

图 2 分别显示了耗能元件出力 F_{BIO} 与系统位移 x 、速度 \dot{x} 间各自的变化关系.根据图 2 所示,在系统质点偏离平衡位置时耗能元件不发生作用,在系统质点回复平衡位置过程中耗能元件输出控制力 f_{max} ,且作用力方向与质点位移方向相反,表现为负恢复力特性且参与结构耗能.

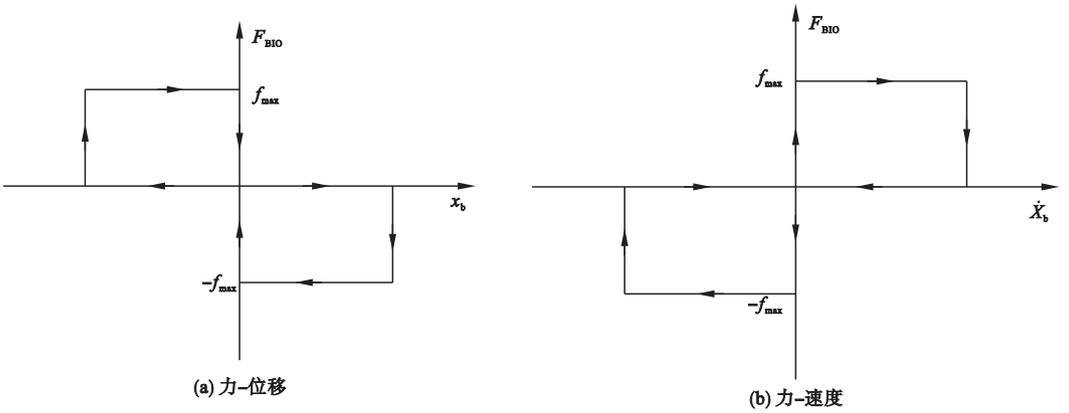


图2 F_{BIO} 与位移、速度的关系

Fig. 2 Force-displacement-velocity plots of BIO force

2 结构隔震设计

2.1 工程概况

工程上部结构为钢筋混凝土框架结构体系,当地设防烈度为8度0.2g,多遇地震下地震影响系数最大值为0.16.场地类别为II类,设计地震分组为第3组,场地特征周期为0.45s.现采用基础隔震技术对该结构进行隔震设计,设计目标是隔震后结构水平地震

作用比非隔震时降低1度,即从原来的8度0.20g降低到7度0.10g进行上部结构抗震设计.结构隔震层设置于结构首层楼板下.整体结构计算模型如图3所示.为确保隔震设计的有效性,笔者主要分析隔震结构与非隔震结构的地震响应,隔震结构的隔震效果、支座位移等,对隔震结构,对比BIO新型隔震和传统线性隔震下结构的地震响应.

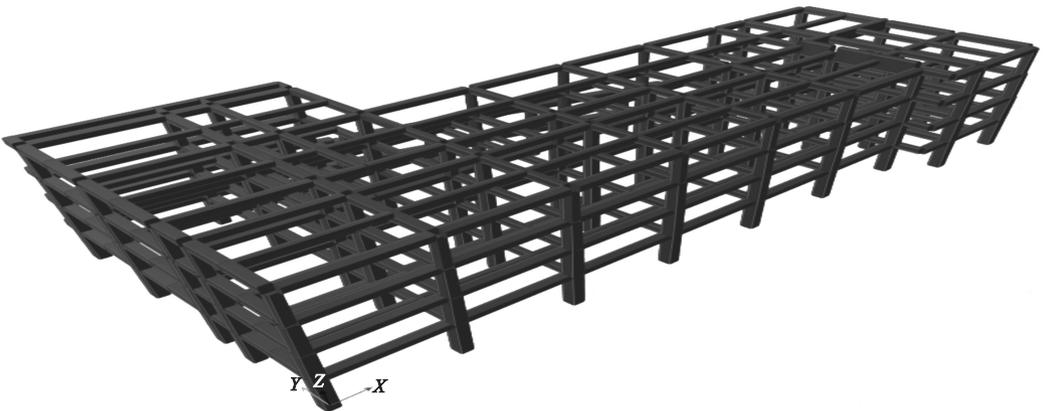


图3 结构三维模型

Fig. 3 Three-dimensional structure model

2.2 地震波选取

工程结构的隔震设计基本设防烈度地震和罕遇地震分别采用2条天然地震波ChiChi和SanFernando,1条人工地震波art4.按照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)的规定,选取用于弹性非线性时程分析的波.地震波反应谱如图4所示.

弹性时程分析的底部剪力结果与反应谱法计算结果对比如表1所示,从表1可以看出,3条波的基底剪力均大于反应谱法的65%且平均值大于80%.地震波的选取满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)要求.反应谱法分析X向基地剪力为37997kN,Y向基地剪力为36549kN.

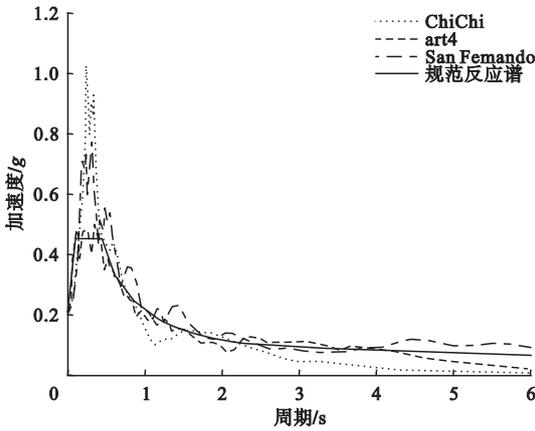


图4 地震波反应谱

Fig. 4 Earthquake wave-response spectrum

表1 时程分析与反应谱分析基底剪力对比

Table 1 Comparison of base shear with time-history and response spectrum analysis

方向	地震波	基底剪力/kN	时程分析与反应谱结果比值/%
X	ChiChi	32 317	85
	SanFernando	31 694	83
	art4	27 336	72
Y	ChiChi	31 432	86
	San Fernando	32 827	90
	art4	26 948	74

2.3 隔震支座设计

隔震支座在底层的47根柱下进行布置.笔者拟采用基于生物启发的新型隔震支座进行隔震设计,取隔震层的总刚度值为87.2 kN/mm,阻尼比为5%,根据优化可得 F_{BIO} 为44 kN时,结构响应最小.当 F_{BIO} 为零,即没有BIO单元时,隔震系统为传统的线性隔震.为了对比BIO新型隔震与传统线性隔震的效果,笔者考虑刚度和阻尼比均和BIO隔震支座相同的线性隔震系统进行对比,隔震支座的参数如表2所示.

表2 隔震支座参数

Table 2 Parameters of isolators

隔震方式	刚度/ (kN·mm ⁻¹)	阻尼/ ((kN·s)·m ⁻¹)	F_{BIO} /kN
BIO 新型隔震	1.85	56.2	44
线性隔震	1.85	56.2	0

2.4 BIO 单元建模

对于BIO新型隔震系统,在现有通用有限元软件中没有现成单元.在ETABS软件中,可采用MultiLinear Elastic单元和Plastic(Wen)单元组合成BIO单元(见图5).从图中可以看出,将MultiLinear Elastic单元和Plastic(Wen)单元最大作用力设置为 $f_{max}/2$,当两者组合时,I、III象限相互抵消,II、IV象限相互叠加,从而得到BIO数值模拟单元.组合BIO单元可以实现BIO隔震系统中的BIO元件,当结构的速度和位移方向相同时, F_{BIO} 为0;当结构的速度和位移方向相反时, F_{BIO} 为预先设定的控制力 f_{max} .

MultiLinear Elastic单元可以自由定义单元的力-位移关系曲线,因此可以设置成使得结构位移为正时始终受到一个负方向的恒力;位移为负时,始终受到一个正方形的恒力.定义单元时,可按表3进行设置,其中的 f_{max} 为设计的 F_{BIO} .在定义Plastic(Wen)单元时,其刚度可取一个很大的数值,文中取为220 000 kN/m;屈服强度取 $f_{max}/2$,屈服后刚度为0,屈服指数取100,即可得到如图5中所示的力-位移关系曲线.

表3 MultiLinear Elastic 单元定义

Table 3 MultiLinear Elastic element define

位移/mm	力/kN
-500	$f_{max}/2$
-0.1	$f_{max}/2$
0.1	$-f_{max}/2$
500	$-f_{max}/2$

图6为组合BIO单元与线性刚度单元,BIO元件表现出负刚度特性.从图可以看出,BIO元件与线性刚度元件组合时,可以在不增加作用力的情况下,有效地增加系统的耗能能力.因此,BIO新型隔震系统可由MultiLinear Elastic单元、Plastic(Wen)单元、Linear刚度单元和Linear阻尼单元组合而成.

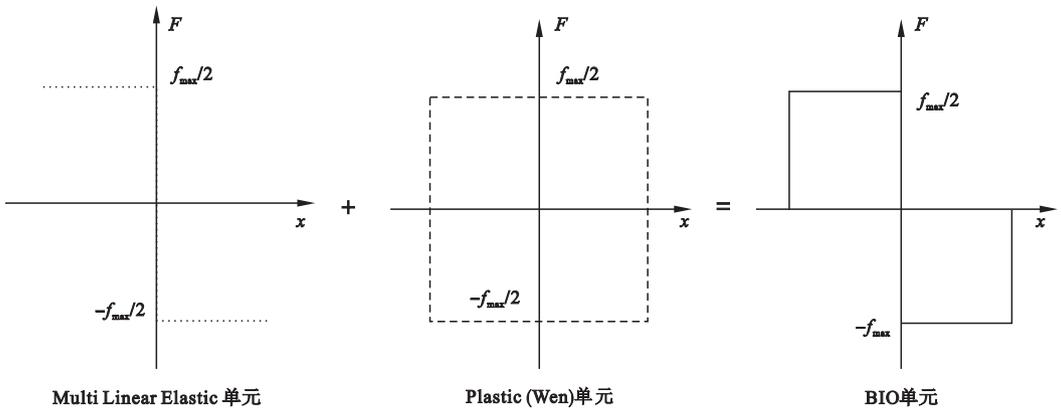


图 5 组合 BIO 单元

Fig. 5 Assembled BIO component

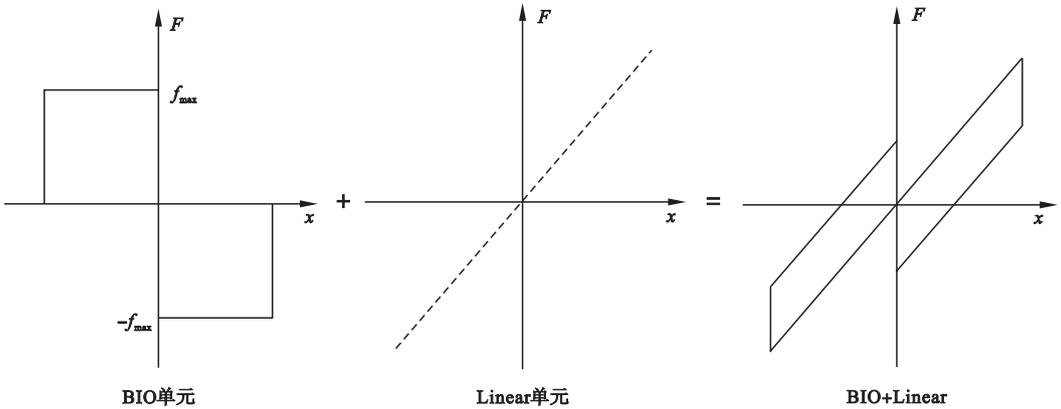


图 6 组合 BIO 单元与线性刚度单元

Fig. 6 Assembled BIO component and linear component

3 结果分析

3.1 模态分析结果

表 4 为隔震前后模型前 5 阶振型周期.

表 4 隔震前后模型前 5 阶振型周期

Table 4 The first five period of structure with and without isolation

模态	周期/s		
	未隔震	BIO 新型隔震	线性隔震
1	0.653	2.443	2.443
2	0.638	2.391	2.391
3	0.566	2.267	2.267
4	0.226	0.323	0.323
5	0.222	0.321	0.321

从表 4 中可以看出,隔震后的结构周期延长约为原结构的 3.7 倍. 根据地震影响系

数曲线可以计算得出,隔震前影响系数为 0.322,隔震后影响系数 0.104,降低了结构响应. BIO 新型隔震与线性隔震的模态分析结果完全一致,说明 BIO 单元对结构模态没有影响.

3.2 水平减震系数

由《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)可知,为实现隔震后地震设防烈度降低 1 度的目标,应使水平向减震系数小于 0.40,对于多层建筑,水平向减震系数为按弹性计算所得的隔震与非隔震各层层间剪力的最大比值. 笔者需要求出中震地震烈度下隔震与非隔震上部结构各层层间剪力的最大比值. 利用 ETABS 非线性时程分析,求得 8 度设防地震作用下该结构隔震与非隔震情况下的层间剪力比值如表 5 所示.

在 ChiChi 波、San Fernando 波和 art 波下, X 向水平剪力比分别为 0.24、0.24 和 0.29, Y 向剪力比分别为 0.23、0.23 和 0.29. 取 3 条地震波工况下的最大值, 因此 X 向的

水平减震系数为 0.29, Y 向的水平减震系数为 0.29, 结构两个方向的减震系数均小于 0.4, 满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)要求.

表 5 层间剪力比

Table 5 Shear ratio in direction

楼层	X 向层间剪力比			Y 向层间剪力比		
	ChiChi	San Fernando	art4	ChiChi	San Fernando	art4
4	0.24	0.24	0.28	0.23	0.21	0.26
3	0.20	0.22	0.26	0.20	0.21	0.25
2	0.19	0.20	0.27	0.19	0.20	0.27
1	0.20	0.23	0.29	0.20	0.23	0.29

图 7 和图 8 分别为 BIO 新型隔震系统和线性隔震系统的 X 向和 Y 向基底剪力, 从图中可以看出, BIO 新型隔震系统的 X 向和 Y 向基底剪力均要小于线性隔震, 减小程度在 10% ~ 25%. 在 ChiChi 波下, 线性隔震 X 向的基底剪力为 8 246 kN, Y 向的基底剪力为 8 164 kN; BIO 新型隔震系统 X 向的基底剪力为 6 429 kN, Y 向的基底剪力为 6 329 kN. X 向和 Y 向的基底剪力改善比例分别为 22.03% 和 22.48%. 线性隔震和 BIO 新型隔震系统下结构基底剪力在不同的地震波作用下有所不同, 但是相差不大.

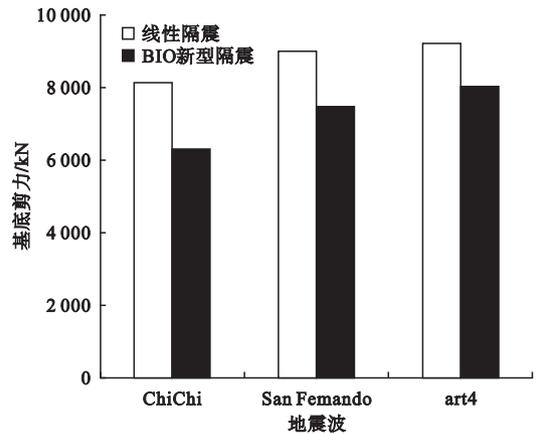


图 8 线性隔震和 BIO 新型隔震系统下结构 Y 向基底剪力

Fig. 8 Base shear of Linear isolation system and BIO innovative isolation in direction Y

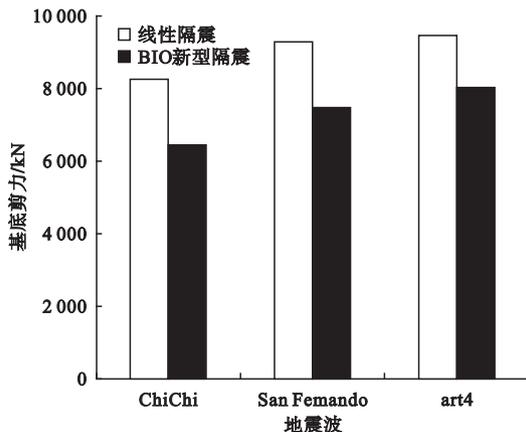


图 7 线性隔震和 BIO 新型隔震系统下结构 X 向基底剪力

Fig. 7 Base shear of Linear isolation system and BIO innovative isolation in direction X

3.3 隔震层位移验算

表 6 为罕遇地震下隔震层支座位移. 由表 6 可知, 罕遇地震下 BIO 隔震支座最大位移为 219 mm, 发生在 Y 向 art 波激励时, 小于支座位移限值 350 mm. 传统线性隔震结构在 3 条地震波下的隔震层位移均大于 BIO 隔震结构隔震层位移. 如在主方向为 X 向 San Fernando 波作用下, BIO 隔震结构隔震层位移为 192 mm, 传统线性隔震结构隔震层位移为 226 mm, BIO 隔震系统隔震层位移比传统线性隔震结构要减小 15.04%. 在主方向为 Y 向 art 波作用下, BIO 隔震结构隔震层位移为

219 mm,传统线性隔震结构隔震层位移为 280 mm,BIO 隔震系统隔震层位移比传统线性隔震结构要减小 21.79%.

表 6 罕遇地震下隔震层支座位移

Table 6 Base drift in severe earthquake

地震波	BIO 隔震支座位移/mm				传统线性隔震支座位移/mm			
	X 方向		Y 方向		X 方向		Y 方向	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
ChiChi	146.44	-181.89	143.36	-178.12	189.02	-200.632	210.5	-223.86
San Fernando	192.36	-168.79	190.74	-174.58	226.17	-203.55	256.61	-227.07
art4	218.23	-166.89	218.82	-174.98	261.84	-225.36	280.21	-230.89

在罕遇地震下,需验算隔震支座的水平变形能力.笔者采用新型隔震支座,单个支座位移取限值为 350 mm.图 9 为在 San Fernando 波大震下 BIO 隔震系统和线性隔震的隔震层位移时程曲线.从图中可以看出,线性隔震系统的位移较大,位移峰值达到 226 mm,BIO 隔震系统的支座位移比线性隔震系统有较大的改善.

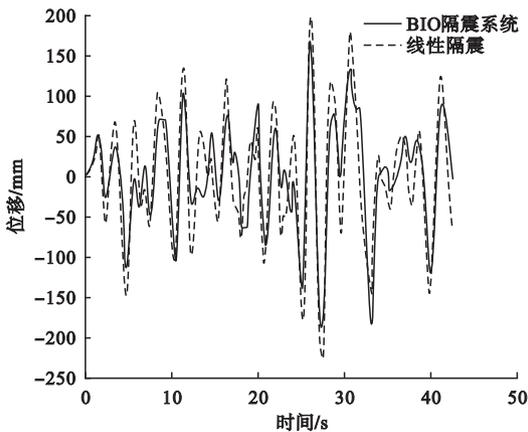


图 9 大震下 San Fernando 波隔震层位移时程曲线
Fig. 9 Time history of base drift under severe San Fernando earthquake

3.4 隔震支座滞回曲线

San Fernando 波大震下 BIO 隔震系统滞回曲线如图 10 所示,其中包括 BIO 单元,线性刚度单元和阻尼单元.从图中可以看出,BIO 隔震系统滞回曲线比较饱满,耗能能力强.图 11 为 BIO 单元滞回曲线,其 F_{BIO} 为 44 kN,由 MultiLinear Elastic 单元和 Plastic (Wen)单元组合而成,从图中可以看出,组合 BIO 单元能够好的模拟 BIO 耗能元件.当

结构离开平衡位置时, F_{BIO} 为 0;当结构向平衡位置运动时, F_{BIO} 为 44 kN.

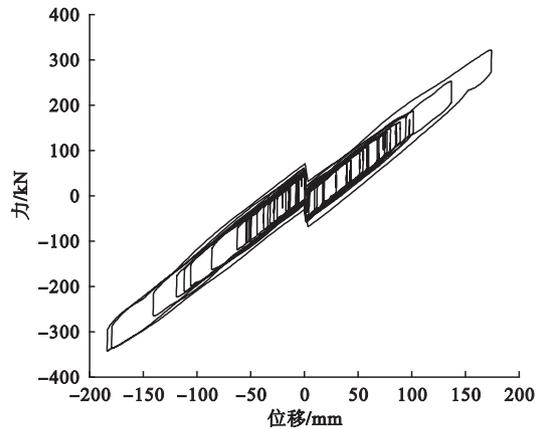


图 10 San Fernando 波大震下 BIO 隔震系统滞回曲线

Fig. 10 Hysteresis curve of BIO isolation under severe San Fernando earthquake

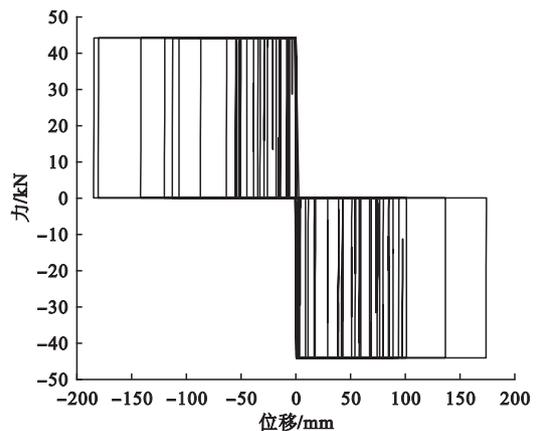


图 11 大震下 San Fernando 波 BIO 单元滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curve of BIO component under severe San Fernando earthquake

图12为大震下 San Fernando 波线性隔震滞回曲线,可以看出其位移和力均比 BIO 隔震系统滞回曲线要大,说明 BIO 隔震系统可以在有效控制隔震层位移的情况下,减小结构基底剪力.对比图10与图12,可以很明显地看出图10的 BIO 隔震系统滞回曲线比图12的线性隔震滞回曲线饱满,耗能能力更强.

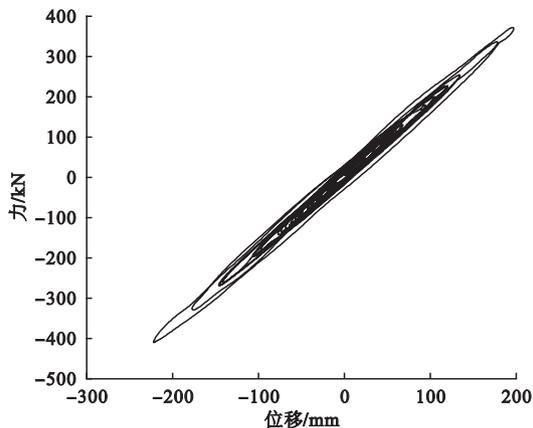


图12 大震下 San Fernando 波线性隔震滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curve of Linear isolation under severe San Fernando earthquake

4 结 论

(1)隔震结构的周期延长为未隔震结构的3.7倍左右,水平减震系数达到0.29,满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)的要求.

(2)BIO隔震系统在罕遇地震下支座最大位移为219 mm,小于支座位移限值350 mm,满足设计要求.

(3)与传统线性隔震相比,BIO隔震系统具有更好的耗能能力,能够有效地降低基底剪力,同时减小隔震层位移.对于基底剪力的改善比例在10%~25%,对于隔震层位移的改善比例在10%~25%.

(4)在ETABS软件中,可采用MultiLinear Elastic单元和Plastic(Wen)单元组合成BIO单元.时程分析结果显示,组合BIO单元能够好的模拟BIO耗能元件.

(5)BIO隔震系统可以有效地增加系统的耗能能力,并减小基底剪力.

参考文献

- [1] HE W F, LIU W G, YANG Q R, et al. Study on dynamic response of large and small aspect ratio isolated buildings[J]. The structural design of tall and special buildings, 2014, 23(17):1329-1344.
- [2] VLADIMIR C, MARIOS P. Seismic response of 20-story base-isolated and fixed-base reinforced concrete structural wall buildings at a near-fault site[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2015, 43(6):927-948.
- [3] 商昊江, 祁皓. 高层隔震结构减震机理探讨[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4):8-12. (SHANG Haojiang, QI Kai. Isolation mechanism of high-rise isolation structure[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(4):8-12.)
- [4] 熊仲明, 黄汉英, 韦俊, 等. 基础隔震结构基于能量分析的仿真研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017(3):322-331. (XIONG Zhongming, HUANG Hanying, WEI Jun. Simulation research for base-isolation based on energy analysis method[J]. Journal of Xi'an university of architecture and technology (natural science edition), 2017(3):322-331.)
- [5] PASALA D T R, SARLIS A A, NAGARAJAI-AHET S, et al. Adaptive negative stiffness: new structural modification approach for seismic protection[J]. Advanced materials research, 2013, 639/640(7):54-66.
- [6] SARLIS A A, PASALA D T R, CON-STANTINOUE T M C, et al. Negative stiffness device for seismic protection of structures: shake table testing of a seismically isolated structure[J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(5):1124-1133.
- [7] 许伟志, 王曙光, 杜东升, 等. 大跨隔震结构多维地震响应有有限元模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(4):131-137. (XU Weizhi, WANG Shuguang, DU Dongsheng, et al. Finite element analysis for multi-dimensional seismic response of long-span isolated structures[J]. Journal of Nanjing university of technology (natural science edition), 2017, 39(4):131-137.)
- [8] 日本建筑学会, 刘文光. 隔震结构设计[M]. 北京:地震出版社, 2006. (Architectural Institute of Japan, LIU Wen-

- guang. Isolation structure design [M]. Beijing: Earthquake Press, 2006.)
- [9] HE W F, LIU W G, YANG Q R, et al. Study on dynamic response of large and small aspect ratio isolated buildings [J]. Structural design of tall & special buildings, 2015, 23 (17) : 1329 - 1344.
- [10] SHAIKHZADEH A A, KARAMODDIN A. Effectiveness of sliding isolators with variable curvature in near - fault ground motions [J]. Structural design of tall & special buildings, 2016, 25 (6) : 278 - 296.
- [11] 陈鹏, 周颖, 刘璐, 等. 带抗拉装置高层隔震结构振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38 (7) : 120 - 128.
(CHEN Peng, ZHOU Yin, LIU Lu, et al. Shake table test on high-rise isolated building with tension-resistant devices [J]. Journal of building structures, 2017, 38 (7) : 120 - 128.)
- [12] 唐克东, 郭祥程, 范程程. 基础隔震多层钢框架结构地震反应分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39 (3) : 91 - 98.
(TANG Kedong, GUO Xiangcheng, FAN Chengcheng. Seismic response analysis of base isolated multi-layer steel frame structure [J]. Journal of earthquake resistant engineering and retrofitting, 2017, 39 (3) : 91 - 98.)
- [13] 金星, 韦永祥, 张红才, 等. 基于强震观测的隔震结构地震反应分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29 (2) : 19 - 28.
(JING Xing, WEI Yongxiang, ZHANG Hongcai, et al. Analysis of seismic responses of a base-isolated building on the basis of strong motion observation [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 29 (2) : 19 - 28.)
- [14] 韩森, 张文会, 朱爱东, 等. 不同层隔震结构在近断层地震作用下动力响应分析 [J]. 振动与冲击, 2016, 35 (5) : 120 - 124.
(HAN Miao, ZHANG Wenhui, ZHU Aidong, et al. Dynamic response analysis for multi-story structures with different isolation stories under near-fault ground motions [J]. Journal of vibration and shock, 2016, 35 (5) : 120 - 124.)
- [15] 韩森, 沙千里, 温增平. 近断层区橡胶支座隔震结构限位研究 [J]. 世界地震工程, 2013, 29 (1) : 74 - 79.
(HAN Miao, SHA Qianli, WEN Zengping. Study on displacement limit of rubber bearing isolation buildings in near-fault region [J]. World earthquake engineering, 2013, 29 (1) : 74 - 79.)
- [16] SOURAV G, SUDIB K. M, SUBRATA C. Performance assessment of buildings isolated by shape-memory-alloy rubber bearing: Comparison with elastomeric bearing under near-fault earthquakes [J]. Structural control & health monitoring, 2014, 21 (4) : 449 - 465.
- [17] 韩森, 崔明珠, 杜红凯. 近断层地震动下基础隔震弹簧限位对结构响应影响试验研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (19) : 175 - 179.
(HAN Miao, CUI Mingzhu, DU Hongkai. Experimental research on the effect of spring displacement-constraint devices on the structural responses of base-isolated structures under near-fault ground motions [J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36 (19) : 175 - 179.)
- [18] 荣强, 张兴, 吴东. 近断层地震动作用下摩擦摆隔震体系的参数研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39 (2) : 85 - 92.
(RONG Qiang, ZHANG Xing, WU Dong. Parametric research of friction pendulum isolation system subjected to near-fault ground motions [J]. Journal of earthquake resistant engineering and retrofitting, 2017, 39 (2) : 85 - 92.)
- [19] KELLY J M. The role of damping in seismic isolation [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1999, 28 (1) : 3 - 20.
- [20] PAUL K H, GEORG E F, JOHANNES H K, et al. Sacrificial bonds in the interfibrillar matrix of bone [J]. Journal of musculoskeletal and neuronal interactions, 2005, 5 (4) : 313.
- [21] CHEN X, HENRY T Y, SHAN J Z, et al. Bio-inspired passive optimized base-isolation system for seismic mitigation of building structures [J]. Journal of engineering mechanics, 2016, 142 (1) : 04015061.