

吴 迪, 霍维刚, 熊 焱, 等. 某高层框架-剪力墙基础隔震结构地震响应分析[J]. 华南地震, 2017, 37 (2): 65-70. [WU Di, HUO Weigang, XIONG Yan, et al. Analysis of Seismic Response of a High-rise Frame-shear Wall Base-isolated Structure[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 65-70.]

## 某高层框架-剪力墙基础隔震结构地震响应分析

吴 迪<sup>1</sup>, 霍维刚<sup>2</sup>, 熊 焱<sup>3</sup>, 谭 平<sup>1</sup>, 沈文涛<sup>1</sup>

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省桥建筑设计院有限公司, 广州 511400;  
3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510604)

**摘要:** 以某高层框架-剪力墙基础隔震建筑结构为研究对象, 采用考虑隔震装置竖向拉、压刚度变化的弹塑性本构关系, 以及上部混凝土框架-剪力墙结构采用弹性本构关系, 建立非线性有限元分析模型, 对模型结构进行动力时程分析, 研究高层框架-剪力墙基础隔震结构的地震响应。分析结果表明: 在设计地震作用下该隔震支座的非线性滞回特性符合支座设计基本要求, 采用基础隔震技术后该高层结构的前几阶周期均有所延长, 上部结构的加速度和层间位移角响应明显减少, 隔震层能耗散部分的地震动输入能量, 隔震技术能够有效降低高层框架-剪力墙结构的地震响应。

**关键词:** 框架-剪力墙结构; 基础隔震; 高层隔震结构; 弹塑性; 有限元

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2017) 02-0065-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.011

## Analysis of Seismic Response of a High-rise Frame-shear Wall Base-isolated Structure

WU Di<sup>1</sup>, HUO Weigang<sup>2</sup>, XIONG Yan<sup>3</sup>, TAN Ping<sup>1</sup>, SHEN Wentao<sup>1</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;  
2. Guangdong Shiqiao Building Design Institute Limited Company, Guangzhou 511400, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Tech, Guangzhou 510640, China;)

**Abstract:** Taking the high-rise frame-shear wall base-isolated building structure as the research object, a nonlinear finite element model is built for qualitative analysis by using the elastic-plastic constitutive model of isolation equipment considering the change relation of tension and compression stiffness in vertical direction and the elastic model of frame-shear wall. The research on the seismic response of a high-rise frame-shear wall base-isolated structure is performed by the time-history analysis of the structure. The analysis results show that the nonlinear hysteretic property of isolation bearing meets the basic design requirement of bearing design. The low order periods of high-rise building are extended by using the base isolation technology. The acceleration

收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 广东省教育厅特色创新项目 (2016KTSCX101)、广州市科技计划 (201707010258)、国家自然科学基金 (51108105)、广州市番禺区珠江科技新星专项 (2013-专 15-3.05)、桂财教 (2014GXNSFBA118264)

作者简介: 吴 迪 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事结构抗震与减震控制研究。

E-mail: 11795234@qq.com.

通信作者: 熊 焱 (1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构防灾减灾方面的研究。

E-mail: xyan@scut.edu.cn.

response and inter-story displacement angle of the upper structure are decreased obviously. Most of ground motion energy is consumed by isolation layer, and the seismic response of a high-rise frame-shear wall structure can be effectively decreased by using the seismic isolation technology.

**Keywords:** Frame-shear wall structure; Base isolation; High-rise isolated structure; Elastic-plastic; Finite element

## 0 引言

隔震技术是结构工程防震减灾的有效手段,并且被逐步应用于高层建筑结构中,如2002年竣工的高130 m的大阪DT办公楼<sup>[1]</sup>,2006年建成的高177.4 m的大阪某超高层隔震建筑(高宽比达到5.7)<sup>[2]</sup>。在我国高层基础隔震技术迅速发展,如2016年建成的高96.5 m的安丘天源新都公寓<sup>[3]</sup>、2009年竣工的高73.6 m的宿迁海关大厦<sup>[4]</sup>,2009年竣工高50 m的宿迁市阳光大厦<sup>[2]</sup>,2013年建造的高89.9 m的玉溪公租房高层住宅等都采用了隔震技术。

在高层框架-剪力墙等隔震结构设计和研究的应用方面,对于隔震建筑结构地震反应计算模型的简化分析方面取得不少研究成果,通过这些计算模型能够获得高层隔震结构的隔震层变形、加速度和层间剪力的近似计算公式,这些研究成果为高层隔震建筑结构设计和技术的应用提供了理论基础。Lee等<sup>[4]</sup>根据UBC-97和UBC-91规范有关隔震结构侧向静力荷载的规定,比较隔震和非隔震结构两自由度模型中的基本振型,提出了隔震结构侧向力的计算公式。付伟庆等<sup>[5]</sup>根据上部结构周期和总基底剪力相等的原则,推导了隔震层以上结构双自由度等效模型的结构参数公式,提出了一种由上部双质点和隔震层组成的三质点计算模型,并通过数值模拟计算提出了等效模型的简化方法。王焕定等<sup>[6]</sup>在Kelly等研究的基础上,根据上部结构周期、总基底剪力和总基底弯矩相等的原则,推导了结构简化模型转换的计算公式,对简化后的等效模型结构应用振型分解反应谱法,求出原结构考虑高阶振型影响的结构最大地震反应,并将这种等效方法应用于高层隔震建筑结构。Weitzmann等<sup>[7]</sup>对单质点等效模型的长周期和阻尼比等进行研究,根据隔震结构的基底剪力来研究上部结构的响应,结果表明对于高层隔震结构,其高阶振型的影响不能忽略。Pourzeynali和Zarif<sup>[8]</sup>运用非劣排序遗传算法对高层隔震结构的质量、刚度和阻尼比优化,同时提出了一个“独立楼层(IS)”的概念,即在不增加结构自身侧向刚度的同时可把结

构的某一层或者某一部分视为一个TMD系统,研究显示运用遗传算法结合新型IS系统和基础隔震技术,可以大幅减少结构顶层的水平位移。刘文光<sup>[9]</sup>基于基底剪力和能量等效的原则提出了快速计算高层隔震结构地震响应的单纯质点法,建立结构模型和单质点简化模的参数转换关系,给出了高层隔震结构的隔震层变形、加速度和层间剪力的预测计算式。

目前基础隔震技术运用于高层建筑方面仍然面临不少问题和挑战。第一,由于高层建筑高宽比相对较大,倾覆效应明显,当采用隔震技术时,有可能使隔震支座出现拉应力,而通常使用的叠层橡胶隔震支座抗拉能力有限。因此,隔震支座受拉问题成为隔震技术在高层建筑中推广应用的主要障碍之一<sup>[10]</sup>。祁皓和范宏伟<sup>[11]</sup>认为存在一个周期的临界值使得隔震结构的高宽比限值达到极大值。第二,高层建筑自振周期较长,通常需要采用水平刚度较大的大直径支座,这时隔震层对结构自振周期的延长作用相比中低层建筑减少,隔震效果较难保证。第三,根据《建筑抗震设计规范》(50011-2010)中12.2.8条的规定:“隔震墙下隔震支座的间距不宜大于2.0 m”。这样的布置会使得隔震墙下的支座间距较小,单个支座分得的竖向荷载减小,由于抗倾覆力臂减小引起拉应力增加<sup>[12]</sup>。实际上对于高层基础隔震结构而言,隔震支座的造价随着截面尺寸增大而大幅提高,因此,为了采用截面尺寸合适的隔震支座,需要在高层隔震结构设计中降低结构在地震作用下的位移响应,即在隔震层布置适当的阻尼来消耗地震能量,以此限制隔震层的位移。

通过采用简化方法计算框架-剪力墙基础隔震结构的弹塑性变形,即考虑隔震装置的弹塑性进行基础隔震结构的有限元建模,完成隔震结构的动力时程分析,得到地震作用下隔震层中隔震支座的非线性力-位移滞回曲线,计算分析框架-剪力墙基础隔震结构的地震响应,在分析基础隔震体系隔震和减震性能的基础上,研究隔震层滤波作用对隔震层之上的上部框架-剪力墙结构动力响

应的影响，为高层框架-剪力墙基础隔震结构设计和理论分析提供模型和计算依据。

1 框架-剪力墙基础隔震结构模型

以某高层框架-剪力墙基础隔震结构为算例，分析其在地震动作用下结构的动力响应。该工程结构属于框架-剪力墙结构，地上主体结构为 23 层，工程设计使用年限 50 年，安全的等级二级。根据《建筑抗震设计规范》（50011-2010）可知本工程所在地区地震基本烈度 8 度，设计基本加速度 0.20 g，设计地震分组第一组。该场地类型属于坚硬场地土，综合为Ⅰ类场地，设计基本周期 0.35 s。本工程处于发震断层 5 km 以内，根据现行抗震规范要求地震波应考虑近场影响系数 1.5。本结构隔震层连接构件采用 C50 混凝土，上部结构柱采用 C50 混凝土，梁、板和墙采用 C40 混凝土，结构主受力钢筋采用 HRB400 ( $f_y=360\text{ N/mm}^2$ ) 和 HRB335 ( $f_y=300\text{ N/mm}^2$ )，箍筋采用 HPB300 ( $f_y=270\text{ N/mm}^2$ )。

本工程隔震体系由 32 个叠层橡胶支座和 37 铅芯橡胶支座组成，其中直径为 1 300 mm 的天然叠层橡胶支座 (LNR1300)26 个，铅芯橡胶支座 (LRB1300)25 个，直径为 1 500 mm 的天然橡胶支座 (LNR1500)6 个，铅芯橡胶支座 (LRB1500)12 个。支座 LNR1300 的竖向刚度为 6 463.60 kN/mm，水平等效刚度为 2.13 kN/mm；支座 LRB1300 的竖向刚度为 7426.70 kN/mm，水平等效刚度为 3.94 kN/mm，屈服力为 565.20 kN；支座 LNR1500 的竖向刚度为 4 437.30 kN/mm，水平等效刚度为 2.27 kN/mm；支座 LRB1500 的竖向刚度为 5 222.40 kN/mm，水平等效刚度为 4.19 kN/mm，屈服力为 565.20 kN。根据 OpenSees 有限元软件单元的基本属性，隔震支座采用 Elastomeric Bearing (Plasticity) Element 单元<sup>[13]</sup>，该单元可同时模拟铅芯和非铅芯橡胶支座的水平剪切力学性能，分别采用三种不同的材料模拟支座在轴向压应力、扭矩以及弯曲变形过程中的性能变化，采用的非线性剪力和位移关系计算模型如图 1 所示。

本文采用有限元分析程序 OpenSees 中两节点连接单元 (twoNodeLink) 和弹塑性缝隙材料 (Elastic-perfectly plasticGap) 的串联单元对支座竖向刚度进行模拟，设置缝隙材料弹性模量为支座竖向刚度的 1/7，以模拟支座竖向拉、压刚度变化特征。并将其与 elastomericBearingPlasticity 单元并

联使用，根据以上所获得的材料信息和构件属性参数，采用通用有限元程序 OpenSees 建立框架-剪力墙基础隔震结构的有限元模型如图 2 所示，并与设计者之前所采用的 Etabs 软件模型进行对比，比较两种模型的特征参数如表 1 所示。

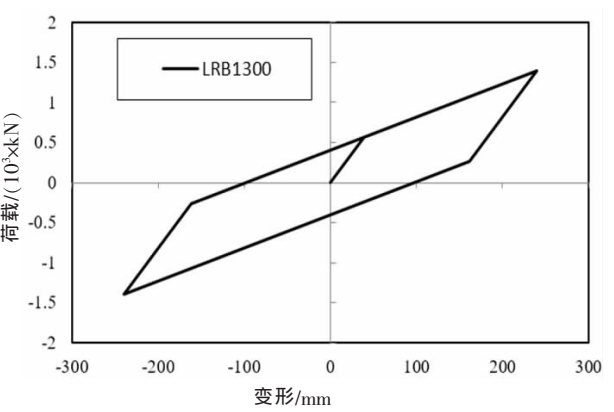


图 1 隔震支座力学滞回模型  
Fig.1 Mechanical hysteretic model of isolation bearing

表 1 模型特征参数对比

Table1 Comparison of characteristic parameters			
周期	OpenSees 模型结果/s	Etabs 模型结果/s	误差/(%)
1	4.48	4.5	0.44
2	4.34	4.37	0.69
3	3.91	4.07	3.93
4	1.26	1.28	1.56
5	1.17	1.23	4.88

2 框架-剪力墙基础隔震结构地震响应和隔震性能分析

对于高层隔震结构而言，延长周期是隔震结构原理通常的解释，即因建筑设置了侧向刚度较小的隔震层，隔震后结构的基本周期延长，相应地震加速度反应谱值往往远小于隔震前的，即地震作用减小了。然而，对于高层建筑而言，隔震前结构的基本周期已经较大，隔震后即使结构的基本周期有明显延长，相应的加速度反应谱值不会有明显降低<sup>[14]</sup>。

根据所建立的高层框架-剪力墙基础隔震结构三维有限元模型，通过该建筑所完成的地震危险性分析，考虑到地震近场影响系数，得到该工程场地 50 年内超越概率 63%、10%、2% 的加速度峰值分别为  $1.5\times70\text{ cm/s}^2$ 、 $1.5\times200\text{ cm/s}^2$  和  $1.5\times400$



$\text{cm/s}^2$ , 并根据场地地震设防烈度 8 度和《建筑抗震设计规范》(GB0011-2010)地震影响系数, 采用与本结构工程场地特征相似的 7 条地震波时程记录, 其中天然强震加速度记录时程曲线 5 条, 人工合成加速度时程曲线 2 条, 对采用基础隔震技术的高层隔震结构和非隔震结构进行结构动力时程分析。我国抗震规范中所提出的当基本自振周期大于 1.5 s 时, 水平地震作用效应的振型个数应适当增加, 振型个数一般可以取振型参与质量达到总质量 90% 所需的振型数。因此, 采用频域分析方法研究高层框架-剪力墙基础隔震结构时, 需要考虑高阶振型对于该隔震结构的影响。

50 年设计基准期超越概率 2% 情况下所采用 7 条地震波中 3 条典型地震加速度反应谱如图 3 所示, 图中地震动反应谱上已标注隔震结构与非隔震  $X$  向前 4 阶结构的自振周期, 由图可知在第 1 阶周期处隔震结构相对非隔震结构反应谱谱值减小约 40%~50%, 在第 2 阶周期处谱值减少 30%~40%, 在第 3 阶周期处谱值减少 20%~30%。由于该结构采用平面对称布置, 其结构自振周期在  $X$  方向和  $Y$  方向基本相同。在罕遇地震下隔震结构与非隔

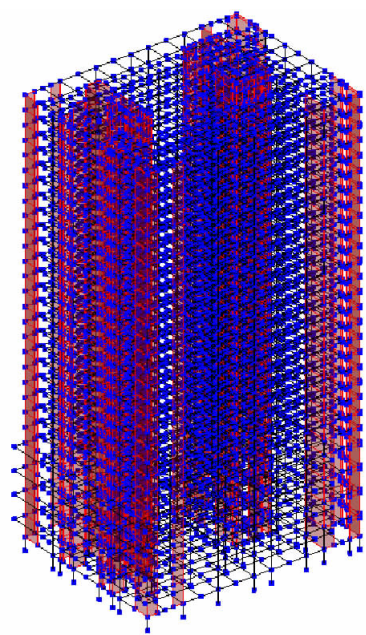


图 2 隔震结构的三维非线性有限元模型

Fig.2 Three-dimensional nonlinear finite element model of isolated structure

震结构层间位移对比如图 4 所示, 由图 4 可知该高层结构隔震后其各层的层间位移角明显降低。

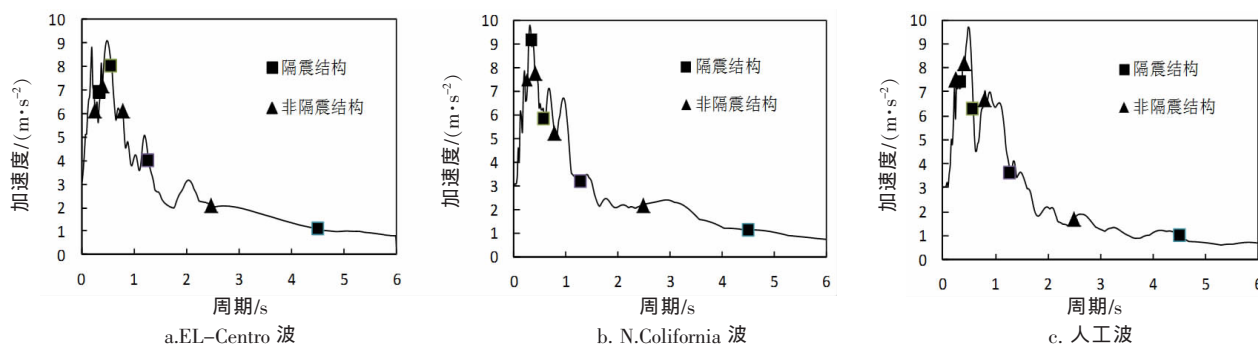


图 3 地震加速度反应谱

Fig.3 Acceleration spectra of ground motion

隔震和非隔震结构顶层  $X$  方向的地震加速度反应结果如图 5 所示, 由图 5 可知隔震结构顶层加速度峰值比非隔震加速度降低约 40% 到 60%, 表明高层隔震结构具有良好的隔震效果。隔震层的复位特性使隔震结构在地震中具有自动复位的功能, 即上部结构恢复至初始的状态, 同时隔震层的铅芯橡胶支座所提供的阻尼能有效耗散地震动能。隔震层中最大竖向压应力铅芯支座的滞回耗能曲线如图 6 所示, 由图 6 可知铅芯橡胶支座滞回曲线饱满, 因此具有良好的耗能效果; 在  $X$  方向 3 条代表性地震波对隔震结构的总能量输入和

隔震层耗能随时间变化的关系如图 7 所示, 由图 7 可知在罕遇地震作用下该高层框架-剪力墙基础隔震结构的隔震层消耗地震动能可达地震动输入总能量的 55%~60%, 隔震层吸收较大比例的输入地震动能。

### 3 结语

考虑隔震装置的弹塑性本构关系, 建立高层框架-剪力墙基础隔震结构的有限元分析模型, 并对其进行动力弹塑性时程分析; 首先, 完成了高层隔震和非隔震结构基于频域的地震响应分析,

结果表明高层框架-剪力墙结构采用基础隔震技术后结构的前几阶周期均有所延长,同时结构前几阶地震动反应谱的谱值明显降低;其次,完成该高层隔震结构基于时域的地震响应分析,结果显示高层框架-剪力墙基础隔震结构的楼层加速度和

层间位移角明显低于非隔震结构;再次,根据高层隔震结构基于能量法获得的隔震结构的能量时程曲线可知,隔震层耗散部分地震的输入能量,有效降低了高层框架-剪力墙结构的地震动能量输入。

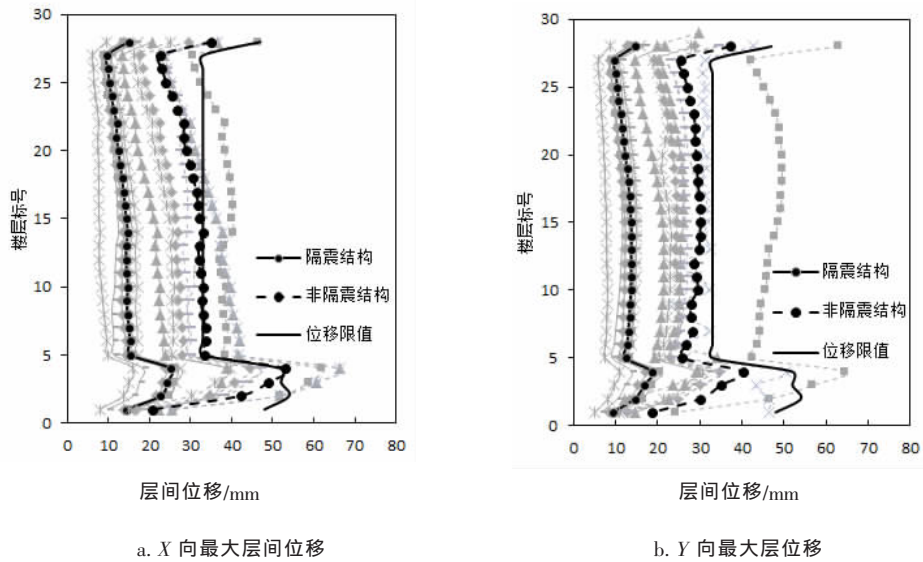


图 4 罕遇地震下结构的层间位移对比

Fig.4 Comparison of inter-story displacement under rare earthquake

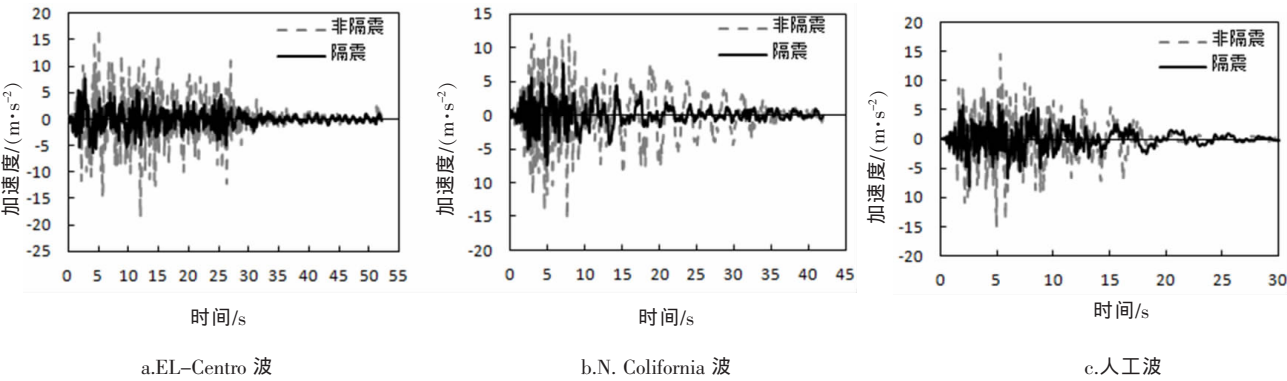


图 5 结构顶层绝对加速度时程

Fig.5 Time history of absolute acceleration on top floor

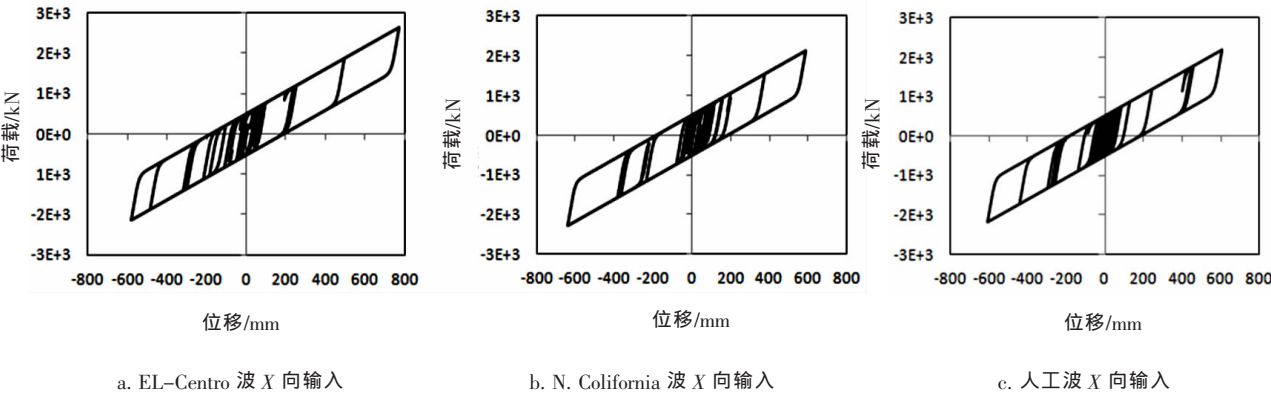


图 6 隔震支座滞回曲线

Fig.6 Hysteretic curves of isolation bearing

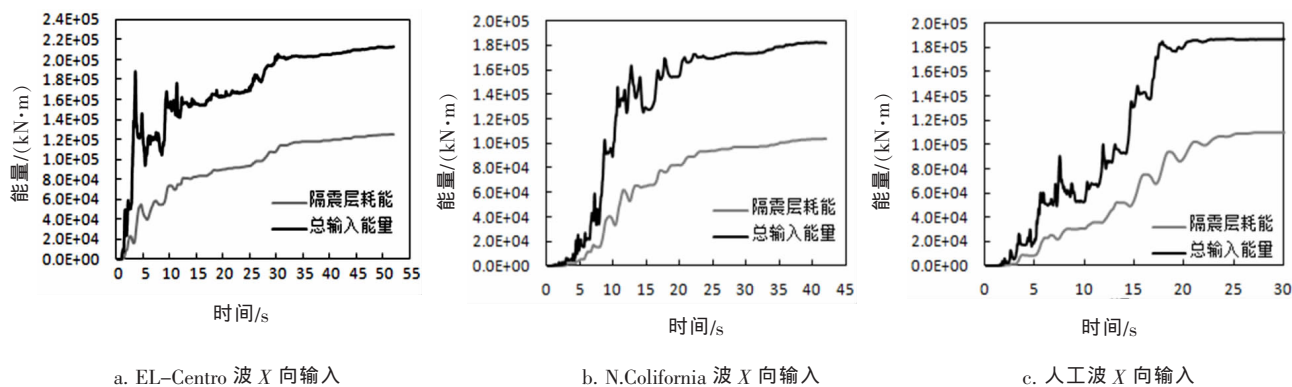


图7 隔震结构的能量时程曲线

Fig.7 Time history curves of energy of isolated building

## 参考文献:

- [1] 何永超, 邓长根, 曾康康, 等. 日本高层建筑基础隔震技术的开发和应用[J]. 工业建筑, 2002, 32 (5): 29-31.
- [2] 杜东升, 王曙光, 刘伟庆, 等. 高层建筑结构非线性地震响应分级及设计方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30 (5): 550-557.
- [3] 李文彦. 天源新都公寓楼隔震设计分析报告[R]. 广州: 广州大学工程抗震研究中心, 2015.
- [4] 杜东升, 刘伟庆, 王曙光, 等. 宿迁海关业务综合楼基础隔震设计[C]// 江苏力学学术大会 2008 暨第四届苏港力学及其应用论坛, 2008.
- [5] Lee D.G., Hong J.M., Kim J.K. Vertical distribution of equivalent static loads for base isolated building structures [J]. Engineering Structures, 2001, 23 (10): 1293-13.
- [6] 付伟庆, 刘文光, 王建, 等. 高层隔震结构的等效简化模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25 (6): 141-145.
- [7] 王焕定, 付伟庆, 刘文光, 等. 规则隔震结构等效简化模型的研究[J]. 工程力学, 2006, 23 (8): 138-143.
- [8] Weitzmann R, Ohsaki M, Nakashima M. Simplified methods for design of base-isolated structures in the long-period high-damping range [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2006, 35 (4): 497-515.
- [9] Pourzeynali S, Zarif M. Multi-objective optimization of seismically isolated high-rise building structures using genetic algorithms [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 311 (3): 1 141-1 160.
- [10] 刘文光, 刘阳, 杨巧荣, 等. 高层隔震结构单质点模型的地震响应单质点法研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25 (6): 693-698.
- [11] 程华群, 刘伟庆, 王曙光. 高层隔震建筑设计中隔震支座受拉问题分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27 (4): 161-166.
- [12] 祁皓, 范宏伟. 基于结构设计的基础隔震结构高宽比限值的研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40 (4): 13-20.
- [13] 熊伟. 高层隔震建筑设计的若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学土木工程与力学学院, 2008.
- [14] 曲哲, 叶列平, 潘鹏. 高层建筑的隔震原理与技术 [J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31 (5): 58-63.