

三维基础隔震结构非线性地震能量响应分析

汪洁¹, 李宇²

(1. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西西安 710055;

2. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘 要:建立了基础隔震结构的地震能量响应方程,利用有限元分析软件模拟了铅销橡胶支座的双向非线性性能,研究了铅销橡胶支座主要参数和不同地震动激励对基础隔震结构非线性地震能量响应的影响.结果表明:(1)铅销橡胶支座的滞回耗能能够消耗大量的地震总输入能,进而证实了其减隔震的有效性;(2)铅销直径和刚度比对其减隔震能力的有较大影响;(3)不同特性的地震动对结构的地震能量响应影响显著.

关键词:铅销橡胶支座;地震能量响应;地震能量方程;基础隔震结构;滞回耗能

中图分类号:U443.361

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)03-0367-04

近年来,抗震设计概念的发展趋势之一是基于能量的抗震设计方法.结构中的耗能减震装置安装在基础之中,从而形成基础隔震结构.基础隔震结构中的耗能装置能够吸收消耗地震的一部分输入能量,从而减少主要构件的能量耗散需求,并尽量减少可能的结构损坏^[1].能量法在基础隔震结构研究中,从单自由度的弹性地震响应发展到多自由度的非线性地震能量响应分析,常用的有相对能量和绝对能量法两种^[2-3].由于相对能量法更能反映工程所关心的参数,故本文采用相对能量法建立基础隔震结构的能量方程.

1 地震能量反应的定义及能量方程

多自由度基础隔震结构的运动方程为^[4-7]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵.

因为多自由度基础隔震结构的地震能量反应定义与单自由度隔震体系的能量反应定义相同,所以将式(4)两端对相对位移积分可得到:

$$\int_0^t [\mathrm{d}\mathbf{x}(t)]^T \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \int_0^t [\mathrm{d}\mathbf{x}(t)]^T \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \int_0^t [\mathrm{d}\mathbf{x}(t)]^T \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\int_0^t [\mathrm{d}\mathbf{x}(t)]^T \mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (2)$$

式中左端三项依次为以相对位移为基础的基础隔震结构的动能 $E_K(t)$ 、阻尼耗能 $E_D(t)$ 、滞回耗能 $E_H(t)$ 和弹性变形能 $E_S(t)$;右端项为地面运动对结构的总输入能量 $E_I(t)$.系统的总输入能与其他能量之和相互平衡,即:

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_H(t) + E_S(t) \quad (3)$$

2 基础隔震结构计算模型

本文采用的基础隔震计算模型如图(1)所示.该模型为四层建筑结构,每个柱子下面加隔震支座,各楼层的高度相等,其总高度为10.97 m.楼板的长、宽都为18.29 m,其中,一到三层的混凝土板厚为25.4 cm,顶层楼板厚为15.24 cm,采用C30混凝土.梁与柱为50 cm×50 cm的矩形截面,采用C40混凝土,箍筋为 $\varphi 20$ 的Q235螺旋钢筋,螺距10 cm,纵筋为 $\varphi 28$ 的HRB335,混凝土保护层厚度为5 cm.

收稿日期:2012-11-02 修改稿日期:2013-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078306);陕西省重点学科建设专项资金资助项目(E01004);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC003)

作者简介:汪洁(1979-),女,河南南阳人,博士,副教授,主要从事桥梁工程抗震与抗风设计方面研究.

铅销橡胶支座(LRB)采用双恢复力一位移滞回理论模型,并选取屈服前刚度 K_1 、屈服后刚度 K_2 和屈服强度 Q 作为铅销橡胶支座的设计控制参数,将非线性模型简化为双线性模型(图2)进行分析计算(本文定义刚度比 η 为屈服后刚度与屈服前刚度的比值,即 $\eta = K_2/K_1$)。铅销橡胶支座的设计参数如表1所示。

《建筑抗震设计规范》中规定,当结构按双向或三向地震波输入时,加速度最大值通常按1(水平

1):0.85(水平2):0.65(竖向)的比例输入^[8]。设地震设防烈度为7度,采用有限元分析软件 SAP2000 建立了基础隔震结构的有限元模型。由于该基础隔震结构质量有偏心,而且是做三维地震响应分析,有输入双向地震动的需要,所以将地震波 El-centro 的南北向、东西向按上述规定调幅后,作为激励沿 X(主方向)、Y 方向输入模型,进行双向地震动作用下的基础隔震结构非线性地震能量响应分析^[9]。

3 铅销橡胶支座的减、隔震有效性分析

本文定义 LRB 滞回耗能比 $\lambda_H(t) = \text{滞回耗能 } E_H(t) / \text{地震总输入能 } E_I(t)$, 阻尼耗能比 $\lambda_D(t) = \text{阻尼耗能 } E_D(t) / \text{地震总输入能 } E_I(t)$ 。图3为基础隔震结构与无隔震结构地震能量反应时程,模型考虑了梁柱接点处塑性铰的非弹性变形。从中可以看出:

(1)在每一瞬时,地震总输入能 $E_I(t)$ 等于系统其它各能量之总和,这就较好的满足了上述的能量平衡方程。

(2)对于基础隔震结构,其系统耗能主要由 LRB 滞回耗能 $E_H(t)$ 和阻尼耗能 $E_D(t)$ 来承担,不过前者远大于后者。如图3(a)所示,LRB 滞回耗能比 $\lambda_H(t)$ 为 80.6%,而阻尼耗能比 $\lambda_D(t)$ 仅为 19.1%。对于无隔震结构,它则是依靠结构非弹性变形(梁柱接点处

的塑形铰)和阻尼来消耗地震能量,如图3(b)所示,其地震总输入能为 445.7 kN·m,而阻尼耗能和非弹性变形能之和(即 $E_C(t)$)为 439.2 kN·m,占总输入能的 98.5%。

4 铅销橡胶支座主要参数的影响

4.1 铅销直径的影响

笔者假定铅销橡胶支座阻尼比为 $\xi=5\%$,刚度比为 $\eta=0.15$,并采用文献[10]中九组不同铅销直径的铅销橡胶支座(如表(2)所示),计算了基础隔震结构的 $E_I(t)$ 、LRB 的 $E_H(t)$ 及 $E_D(t)$,研究了铅销直径的变化对基础隔震结构地震能量响应的影响。

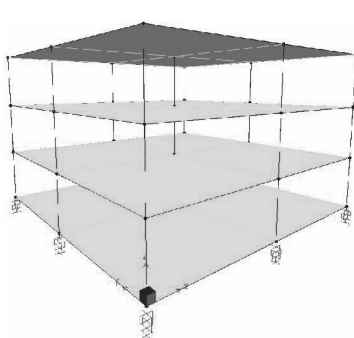


图1 三维基础隔震结构示意模型

Fig.1 3D base-isolation structure model

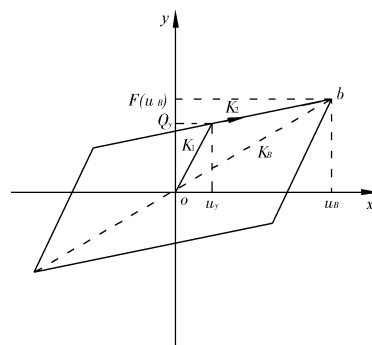


图2 铅销橡胶支座双线性滞回模型

Fig.2 Bilinear hysteretic model of lead rubber bearing

表1 铅销橡胶支座(LRB)设计参数

Tab.1 Design parameter of lead rubber bearing

位置	铅销直径 D/mm	屈服强度 Q/N	屈服前刚度 $K_1 / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	刚度比 η
柱底	50	26 253	1 881 688	0.15

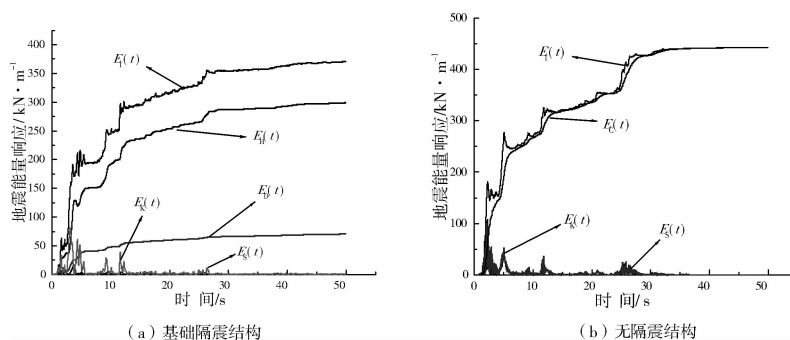


图3 建筑结构地震能量反应时程

Fig.3 Seismic energy response for structure

表 2 铅销橡胶支座动力参数

Tab. 2 Mechanical parameter of lead rubber bearing									
铅销直径/mm	50	60	70	80	90	100	110	120	130
屈服前刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	1 881 688	2 709 630	3 688 108	4 817 120	6 096 668	7 526 750	9 107 368	10 838 520	12 720 208
屈服强度/N	26 253	36 044	47 616	60 968	76 100	93 012	111 705	132 177	154 430

从图(4)中可以看出,随着铅销直径的增加, $E_I(t)$ 、 $E_H(t)$ 及 $E_D(t)$ 都呈现出整体递增的趋势,它们的增幅分别为 35.4%, 27.4%, 56.3%。可见,铅销直径对基础隔震结构地震能量响应的影响十分显著。

从图(5)中可以看出,铅销直径增大时,LRB 滞回耗能比 $\lambda_H(t)$ 不断减小,下降了 8.9%;阻尼耗能比 $\lambda_D(t)$ 呈现递增趋势,增长了 9.1%。

4.2 刚度比 η 的影响

本文假定铅销橡胶支座的阻尼比为 $\xi=5\%$,屈服前刚度与屈服强度采用表(1)的数值,分别计算了刚度比 $\eta=0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ 和 0.25 时,基础隔震结构的 $E_I(t)$ 、LRB $E_H(t)$ 以及 $E_D(t)$,研究了 η 的变化对基础隔震结构地震能量响应的影响。从表(3)中可以看出:

(1)基础隔震结构的地震总输入能 $E_I(t)$ 、LRB 滞回耗能 $E_H(t)$ 以及阻尼耗能 $E_D(t)$ 的变化趋势基本上一致,均随刚度比的增大而增大。如果以常用刚度比 $\eta=0.15$ 所对应的 $E_I(t)$ 、 $E_H(t)$ 及 $E_D(t)$ 为基准,则其它的刚度硬化比所对应的 $E_I(t)$ 、 $E_H(t)$ 及 $E_D(t)$ 分别与其相差 7.55%~7.8%、4.3%~4.5%、21.3%~21.9%。

(2)随着刚度比 η 的增大,LRB 滞回耗能比 $\lambda_H(t)$ 呈递减趋势(由 83.48% 降至 78.15%),而阻尼耗能比 $\lambda_D(t)$ 则在增大(由 19.35%增至 27.55%)。

5 不同特性地震动激励的影响

本文选取了四条特性各异的地震波(如表(4)所示)输入计算模型。其计算结果见表(5),它表明:

(1)基础隔震结构的地震能量响应,不同特性的地震波结构地震能量响应最大可相差 8~10 倍。

(2)场地条件不利。本例中结构模型在 X 和 Y 方向的基本周期分别为 1.28~1.33 s 和 1.32~1.37 s。

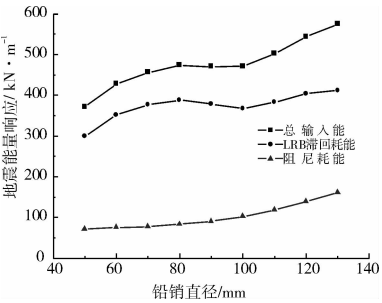


图 4 铅销直径对地震能量响应的影响
Fig. 4 Effect of diameter of lead on seismic energy response

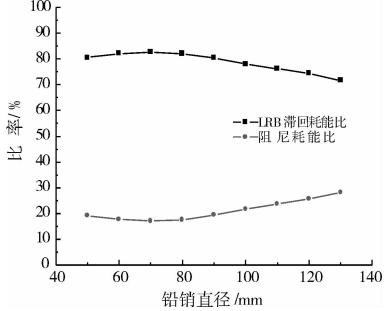


图 5 铅销直径对 LRB 滞回耗能比和阻尼耗能比的影响
Fig. 5 Effect of diameter of lead on $\lambda_H(t)$ and $\lambda_D(t)$

表 3 刚度比 η 对基础隔震结构地震能量响应的影响

Tab. 3 Effect of stiffness ratio on seismic energy of base-isolation structure					
刚度比	总输入能 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	滞回耗能 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	阻尼耗能 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	滞回耗 能比/%	阻尼耗 能比/%
0.05	342.1	285.6	55.26	83.48	19.35
0.1	356.4	293.5	61.57	82.35	20.98
0.15	371.1	299.1	70.75	80.60	19.06
0.2	385.3	305.2	78.79	79.21	25.82
0.25	399.1	311.9	85.92	78.15	27.55

表 4 双向地震波特性

Tab. 4 Characteristics of bidirectional seismic motions						
地震波 名称	峰值加速度/g		持时/s		特征周期/s	
	南北向	东西向	南北向	东西向	南北向	东西向
Northridge	0.883 6	0.370 3	56.98	59.98	0.22	0.10
Kobe	0.834 5	0.629 7	150.0	150.0	0.34	0.38
El-centro	0.356 9	0.214 2	53.72	53.46	0.54	0.5
天津波	0.148 8	0.106 3	19.19	19.19	0.90	1.00

表 5 不同特性地震激励下的基础隔震结构地震能量响应

Tab. 5 Effect of dissimilar seismic excitations on seismic energy response of base-isolated structure					
地震波 名称	总输入能 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	滞回耗能 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	阻尼耗能 / $\text{kN} \cdot \text{m}$	滞回耗 能比/%	阻尼耗 能比/%
Northridge	95.50	74.80	20.16	78.32	21.11
Kobe	315.7	249.4	66.27	79.00	20.99
El-centro	470.2	378.3	91.06	80.46	19.37
天津波	678.2	487.3	190.6	71.84	28.10

6 结 语

本文通过对基础隔震结构地震输入总能量及其分配规律的研究,得到以下结论:(1)铅销橡胶支座的滞回耗能能够消耗大量的地震总输入能,进而证实了其减隔震的有效性;(2)铅销直径和刚度比对其减隔震能力的有较大影响,其合理的取值范围还有待进一步研究;(3)不同特性的地震动对结构的地震能量响应影响显著。

参考文献 References

- [1] SONG T T, DARGUSH G F. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering [M]. USA: JHON WILEY & SONS, 1997.
- [2] BRUNEAU Michel, WANG Niandi. Some aspects of energy methods for the inelastic seismic response of ductile SDOF structures[J]. Engineering Structures, 1996, 18(1): 1-12.
- [3] DECANINI Luis D, MOLLAIOLI Fbrizio. An energy- based methodology for the assessment of seismic demand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21: 113-137.
- [4] 钟铁毅, 杨风利, 夏 禾. 基于能量法的铅芯橡胶支座隔震桥梁设计方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 43-48. ZHONG Tie-yi, YANG Feng-li, XIA He. The Design Method of the Seismically Isolated Bridge by Lead Rubber Bearing Based on Energy Method[J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 43-48.
- [5] DUTTA Anindya. On Energy Based Seismic Analysis and Design of Highway Bridge[D]. Faculty of the Graduate School of the State University of New York at Buffalo, 1999.
- [6] HOUSNER G W. Limit Design of Structures to Resist Earthquake, Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering, Berkeley, CA[C], 1956.
- [7] MCKEVIT, W E. et al. Hysteretic Energy Spectra in Seismic Design[C]//Proceedings of 7th WCEE, Vol. 7, 1980.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2010. Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [9] 钟铁毅, 李 宇, 杨风利, 等. 铅芯橡胶支座隔震连续梁桥的地震能量反应分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(3): 9-14. ZHONG Tie-yi, LI Yu, YANG Feng-li, et al. Analysis on the Seismic Energy Continuous Beam Bridge Response for Seismically Isolated with Lead Rubber Bearing[J]. China Railway Science, 2009, 30(3): 9-14.
- [10] 张贞阁. 铁路连续梁桥的减隔震性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2003. ZHANG Zhen-ge. Seismic Isolation Performance study of Railway Continuous Beam Bridge [D]. Beijing: Beijing JiaoTong University, 2003.

Analysis on nonlinear seismic energy response for 3-D base-isolated structures

WANG Jie¹, LI Yu²

(1. Key Laboratory of Structural and Earthquake Resistance, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The energy equations of the base-isolated structures are established based on the energy equilibrium theory. Considering the effect of principal parameters of lead rubber bearing and dissimilar seismic motions, dimensional FEA model of base-isolated structures is established. The seismic energy response analyses for base-isolated structures are carried out under the three-dimensional seismic motions. Results are obtained as follows. (1) Most of the seismic input energy can be consumed by the hysteretic energy dissipation of lead rubber bearing. (2) Lead core diameter or stiffness ratio have great effect on seismic energy response of base-isolated structure. (3) The seismic energy response of base-isolated structure is greatly discrepant under different seismic motions.

Key words: lead rubber bearing; seismic energy response; seismic energy equations; base-isolated structures; hysteretic energy dissipation