

滑移隔震结构基于能量分析的简化计算方法研究

熊仲明^{1,2,3}, 张萍萍¹, 韦俊^{2,4}, 刘晓通¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011;
3. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055; 4. 苏州科技学院机电工程系, 江苏 苏州 215009)

摘 要:采用能量法对多自由度剪切型结构隔震体系进行非线性地震反应分析时,其计算量大、分析复杂,难以用于工程实际.针对上述问题,将其多自由度振动方程进行求解分析,找到一种等代体系来简化隔震体系的求解过程,并简要分析了近断层地震动三要素对滑移隔振结构总输入能的影响.最后,对一五层框架隔震结构模型分别采用能量分析法和简化后的能量法进行计算,将其结果进行对比,说明了本文提出的计算方法是偏于安全的,为工程的抗震设计提供参考.

关键词:滑移隔震;能量分析;地震反应

中图分类号:TU352

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)03-0305-05

滑移隔震结构作为一种经济有效的防灾减灾措施,一直是工程领域研究的重点,而隔震效果的具体体现就是结构对能量的耗散能力.众多研究表明,地震中能量的耗散过程不仅与结构本身的抗震性能有关,还与地震动的特性紧密相关,地震动的特性可以通过其振幅、频谱和持时三要素来描述,因此研究地震动三要素对结构的总输入能的影响很有现实意义,同时,隔震结构一般是多自由度结构体系,对隔震结构体系进行非线性地震反应分析时,其研究意义重大,但计算量大、分析复杂,若能简化隔震结构计算模型,能量法的应用就更为方便.本文通过对较少自由度的等代模型的分析来实现隔震结构能量分析的简化计算方法.

1 滑移隔振结构的地震能量反应分析

图1(a)为多自由度层间剪切型隔震体系的计算模型,质量分别集中于底板和楼板处,其处于滑动状态时的运动方程为:

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [c]\{\dot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = -\ddot{u}_0[m]\{I\} + \{F\} \quad (1)$$

$$\{x(t)\} = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)\}^T \quad (2)$$

$$\{F\} = \{-\operatorname{sgn}(\dot{x}(t))M\mu g, 0, 0, \dots, 0\}^T \quad (3)$$

上式中: $[m]$ 、 $[k]$ 、 $[c]$ 分别为上部结构的质量矩阵、刚度矩阵及阻尼矩阵; $\{I\}$ 是单位向量; $x_i(t)$ 为 m_i 相对于地面的位移, m ; M 是隔震体系上部结构的总质量, kg ; \ddot{u}_0 是地面加速度, m/s^2 ; μ 是结构的摩擦系数; g 是重力加速度, m/s^2 .

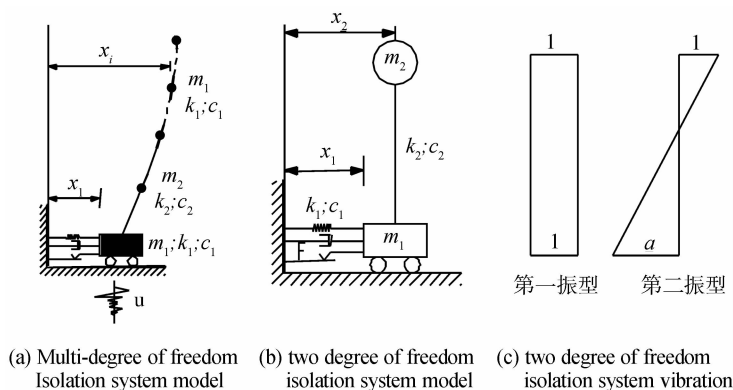


图1 基础滑移隔震结构的计算模型

Fig. 1 The calculation model of the sliding isolation structure

收稿日期:2011-12-08 修改稿日期:2012-05-03

基金项目:西安市科技攻关课题(GG04051);江苏省重点结构实验室资助课题(ZD0803);陕西省教育厅专项基金资助(09JK550)

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.

将方程(1)对绝对位移进行积分并整理,得到系统的绝对能量的平衡方程:

$$E_k^{ab}(t) + E_k^{as}(t) + E_D^{ab}(t) + E_D^{as}(t) + E_s^{ab}(t) + E_s^{as}(t) + E_f^a(t) = E_1^a(t) \quad (4)$$

上式中:a为绝对能量;b为滑块;s为上部结构.由于系统中动能和势能相互转化最终都趋近于零,这里只给出结构的阻尼耗能、滞回耗能以及结构的总输入能表达式^[1]:

$$E_D^{ab}(t) = \int_{t_0}^t c_b \dot{x}_b(t) \dot{x}_b(t) dt \quad (5)$$

$$E_D^{as}(t) = \int_{t_0}^t \{\dot{x}(t)\}^T [c] \{\dot{x}(t)\} dt \quad (6)$$

$$E_f^a(t) = \int_{t_0}^t F_f(t) \dot{x}_b(t) dt \quad (7)$$

$$E_1^a(t) = \int_{t_0}^t \{r\}^T \dot{u}_g(t) [M] (\{\ddot{x}(t)\} + \{r\}^T (\ddot{u}_g(t) + \ddot{x}_b(t))) dt + \int_{t_0}^t m_n (\ddot{x}_b(t) + \ddot{u}_g(t)) \dot{u}_g(t) dt \quad (8)$$

式中: c_b 为滑块的阻尼; $E_k^a(t)$ 为滑块与地面间的摩擦耗能; $E_1^a(t)$ 为结构的绝对总输入能; $E_k^{ab}(t)$ 、 $E_s^{ab}(t)$ 、 $E_D^{ab}(t)$ 分别为滑块的动能、弹性势能、阻尼耗能; $E_k^{as}(t)$ 、 $E_s^{as}(t)$ 、 $E_D^{as}(t)$ 分别为上部结构的动能、弹性势能、阻尼耗能.

2 滑移隔振结构简化计算模型的建立

为计算简便,找到一种等代体系^[2],使之在分析多自由度剪切型结构抗震体系时起到减少自由度的作用,达到简化理论分析的目的.通常采用图1(b)所示的二自由度隔震体系作为简化模型.这一模型的特点是:当隔震体系不滑动时,单自由度等代体系能够模拟多自由度体系的基本特征;当隔震体系滑动时,上部结构对隔震层的反应能起到很好的模拟,使等代模型的结果能很好地接近多自由度体系,根据文献[3]可知,其计算精确度能满足工程应用.

对于图1(b)所示体系,如果忽略限位装置的刚度和阻尼,设质量比 $\alpha = m_2/m_1$,其自由振动方程为:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k(x_1 - x_2) = 0 \quad (9)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k(x_2 - x_1) = 0 \quad (10)$$

$$\text{可得其滑动振动的自振频率: } \omega_1^* = 0, \omega_2^* = \omega \sqrt{\alpha + 1} \quad (11)$$

其中, ω 是二自由度隔震结构基础固定时的自振频率, $\omega = \sqrt{k/m_2}$.滑移时的振型如图1(c)所示.

由上述结论可知,要使二自由度等代体系能很好地模拟多自由度隔震结构,则在自振特性上要求结构不滑动时,等代体系的基频 ω 等于多自由度剪切型结构基频 ω_1 ($\omega_1 = \omega$);结构进入滑动状态时,等代体系的第二频率 ω_2^* 应与多自由度剪切型结构滑动时的第二自振频率 ω_2 相等($\omega_2^* = \omega_2$).又根据文献[4]可知,对于剪切型结构的第二基频是第一基频的2倍,即 $\omega_2^* = 2\omega_1$.所以对于等代体系也要求 $\omega_2^* = 2\omega$,将此式代入(11)式可得 $\alpha = 3$.

因此,采用图1(b)所示的等代体系模拟多自由度剪切型结构隔震体系,选择 $\sqrt{k/m_2}$ 等于多自由度剪切型结构的第一基频 ω_1 ;质量比 α 等于3; $m_1 + m_2$ 等于多自由度剪切型结构隔震体系的总质量和,以简化对隔震体系的计算和分析.

3 近断层地震动三要素对滑移隔震结构总输入能的影响

近些年发生的大地震中近场地震的巨大破坏能力表现尤其明显,由于其长周期速度脉冲的作用,能量的散发是以递增的形式进行^[5],难以在短时间内耗散,会对结构造成更为严重的破坏,因此研究近断层地震动三要素对结构的总输入能很有现实意义.本文选用由Taft波改造而来的人工波和具有近断层地震波^[6-8]长持时和速度脉冲的特点的,发生在断层距15 km以内的Imperial Valley波和Taiwan chi-chi波^[9],来研究近断层地震动对结构的响应,得出一些结论:

(1) 地震动幅值的影响:地震动振幅可以是地震动加速度、速度、位移三者之一的最大值、峰值或某种意义的有效值,工程中一般采用地面最大加速度峰值进行考虑. 将上述所选的波进行调幅,计算结果见表 1 所示,由于篇幅有限仅以 Imperial Valley 波说明,从表中可看出随着加速度峰值的增加,结构的总输入能增加,相应的结构阻尼耗能和滑移隔震单元的连接滞回耗能也随之增加.

表 1 Imperial Valley 波不同峰值下能量分配(单位:kN·m)
Tab. 1 Energy distribution under different peak of Imperial Valley wave (unit: kN·m)

加速度峰值/cm·s ⁻²	总输入能 E_I	阻尼耗能 E_D	连接滞回耗能 E_H	E_D/E_I	E_H/E_I
220	1 296.35	948.64	347.71	73.2%	26.8%
400	3 824.32	2 815.36	1 008.96	73.7%	26.3%
620	8 669.29	6 472.78	2 196.51	74.7%	25.3%

(2) 频谱特性的影响:本文主要通过地震波的卓越周期来考虑地震频谱特性对结构反应的影响. 采用以上所选波,调整加速度调峰值为 300 cm/s²,地震持续时间为 30 s. 本文所采用的结构模型最大自振周期为 1.83 s,阻尼比取为 0.05. 从表 2 可以看出,地震波的卓越周期与结构的自振周期越接近,结构的总输入能越大,相应的阻尼耗能和连接滞回耗能也就越大,其中,Taiwan chi-chi 波的卓越周期与结构自振周期接近,其滑移支座的连接滞回耗能所占总输入能的比例与其它波相比之下稍大一些,可以认为当地震波的卓越周期与结构的自振周期越接近时,滑移支座的耗能也就越明显.

表 2 加速度峰值调为 300 cm/s² 各波的能量分配(单位:kN·m)
Tab. 2 Energy distribution under different wave of the peak acceleration for 300 cm/s² (unit: kN·m)

地震波	总输入能 E_I	阻尼耗能 E_D	连接滞回耗能 E_H	卓越周期/s	E_D/E_I	E_H/E_I
Imperial Valley	2 330.00	1 709.09	620.91	0.26	73.4%	26.6%
Taiwan chi-chi	3 164.94	2 083.54	1 081.40	0.54	65.8%	34.2%
上海人工波	2 501.42	1 774.42	727.00	0.10	70.9%	29.1%

(3) 强震持时的影响:强地震动的持续时间对结构的影响,主要发生在结构反应进入非线性化之后. 仍然采取上述三种地震波,加速度峰值都调整的为 400 cm/s²,取不同持时值,仅以 Imperial Valley 波说明,从表 3 看出,不同的地震波持时对总输入能的影响是一致的,随着持时的增加,输入到结构中的总能量不断增加,增加到一定程度后变化不大.

表 3 不同持时下 Imperial Valley 波能量分配(单位:kN·m)
Tab. 3 Energy distribution under different duration of Imperial Valley wave (unit: kN·m)

	5 s	10 s	15 s	20 s	25 s	30 s
E_I	0	3 749.91	3 735.66	3 735.66	3 810.28	3 968.16
E_H	0	2 178.53	1 320.51	1 087.05	1 043.86	1 045.93
E_H/E_I	0	58.10%	35.35%	29.10%	27.40%	26.35%

4 计算实例分析

采用五层的钢筋混凝土框架结构,柱截面为 400 mm×400 mm,边梁截面为 250 mm×650 mm,中梁截面为 250 mm×450 mm,梁、柱的混凝土均采用 C30,主筋采用 HRB335 级钢筋,箍筋采用 HRB235 级钢筋,抗震设防烈度为 9 度,第一组,Ⅱ类场地. 采用 SAP2000 对该结构进行地震作用分析,采用摩擦摆隔振单元来模拟滑移层的滑移支承元件,在框架结构底层的柱下端布置摩擦摆隔振连接单元^[9]. 建筑结构的平立面布置示意图如图 2 所示.

4.1 采用能量地震反应分析

本算例采用双线性恢复力模型^[10],输入 El-Centro 波^[12],并将其加速度调整为 9 度设防. 计算所得 1 层及 5 层位移时程如图 3,结构的能量时程曲线如图 4.

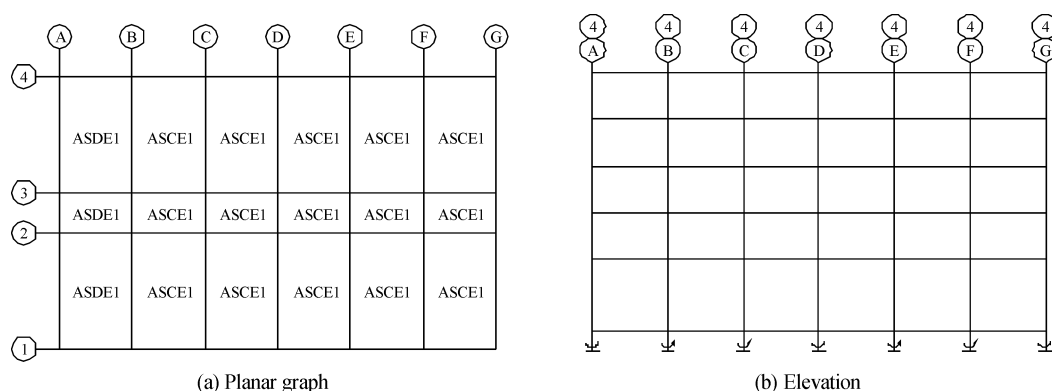


图2 建筑结构平立面布置示意图

Fig. 2 The plane and elevation layout diagram of the building structure

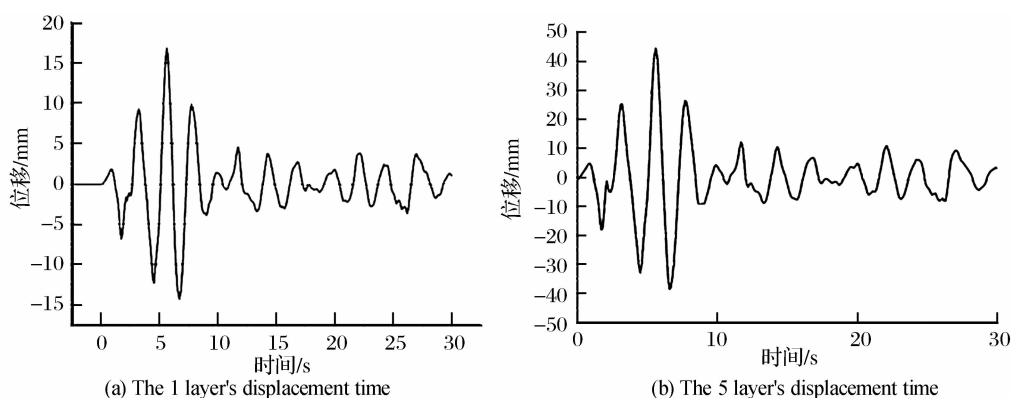


图3 El Centro 波下的各层位移时程图

Fig. 3 Time-history displacement of each layer under the El- Centro wave

从图3可看出,结构的最大位移一般产生在地震动作用较强的时段内,而当地震动作用相对平缓时,结构的位移反应也相应的变小.从图4中我们可以看出,在地震动输入过程中,随着持续时间的增加,输入到结构中的总能量是不断增大的,结构能量中的动能和弹性应变能通过相互转化,在地震动作用结束时都变为零,结构获得的绝大部分能量是通过阻尼耗能和滞回耗能来耗散掉的.还可以看出,结构的连接滞回耗能开始时随着总输入能的增大而增大,当总输入能基本达到峰值时连接滞回耗能也达到峰值,随后滞回耗能不断减小直至稳定,这说明滑移隔震元件在强震时消耗了结构的大部分输入能,起到保护结构的功能.

4.2 基于能量抗震设计简化计算

根据本文中的等代简化方法,将图2所示框架模型转化为等效的单自由度体系,等代模型中结构上部质量为 m_1 、下部质量为 m_2 ,取 $m_1/m_2=3$ 即 α 等于3,根据文献[11]的时程分析方法,输入El Centro波计算出地震中质点的弹性能量,利用公式(5)、(6)、(7)、(8),最终得到在不同时间时总输入能,阻尼耗能和摩擦耗能的计算值,见表4.从表4中可以明显看出,在不同的持续时间上,将本文提出的基于能量的抗震设计的简化计算方法计算出的结果同采用时程分析计算的结果相比较,摩擦耗能相接近,总输入能、阻尼耗能值稍偏保守,可以说明本文提出的简化计算方法对于实际工程是比较安全的.

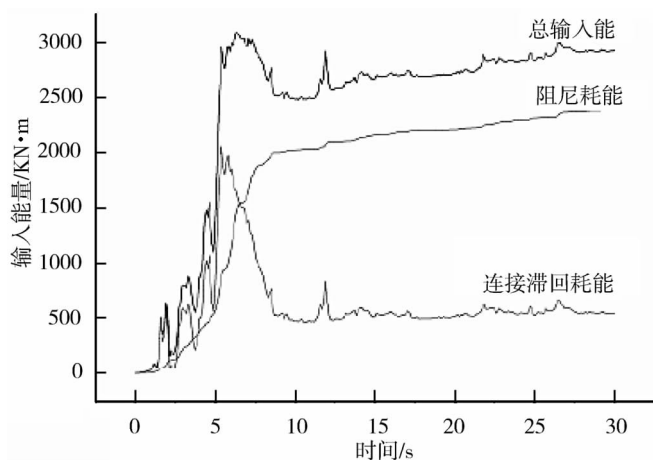


图4 El Centro 波下的能量时程图

Fig. 4 Time-history energy curve under the El- Centro wave

表 4 采用时程分析与简化方法计算总输入能、滞回耗能和阻尼耗能计算结果的对比

Tab. 4 contrast of the results of calculation with total input energy, hysteretic energy and damping energy by time-history analysis method and simplified calculation method

时间/s	采用时程分析				简化计算			
	总输入能 E_1	阻尼耗能 E_D	摩擦耗能 E_f	E_D/E_1	总输入能 E_1	阻尼耗能 E_D	摩擦耗能 E_f	E_D/E_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1 542.60	570.68	971.92	0.37	1 635.52	628.94	1 006.58	0.38
15	3 085.92	2 150.70	935.22	0.70	3 265.33	2 310.71	954.62	0.71
20	3 085.92	2 197.25	888.67	0.71	3 278.65	2 372.14	906.51	0.72
25	3 085.92	2 298.91	787.01	0.74	3 280.55	2 475.34	805.21	0.75
30	3 085.92	2 369.66	716.26	0.77	3 315.65	2 585.01	730.64	0.78

5 结 论

本文通过实例计算分析得出以下结论：

- (1)随着输入到结构地震波的加速度峰值的增加,结构的总输入能就增加;地震波的卓越周期与结构的自振周期越接近,结构的总输入能也越大,相应的阻尼耗能和连接滞回耗能也就越大;持时在相同的地震波作用下越长,结构的总输入能也就越大,增加到一定程度后变化不大。
- (2)通过对多自由度滑移隔震结构的等代模型的分析,提出滑移隔震结构能量分析的简化计算方法,并运用实例将其简化计算结果与时程分析结果对比,说明简化计算方法是偏于安全的。

参考文献 References

[1] 党育,杜永峰,李慧.基础隔震结构设计及施工指南[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
DANG Yu, DU Yong-feng, LI Hui. The design and construction guidelines of Base-isolation structure [M]. Beijing:Chinese Water Conservancy and Hydropower Press, 2006.

[2] 姚谦峰,梅占馨,吴敏哲.滑移隔震结构振动分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,1999,31(3),208-210.
YAO Qian-feng, MEI Zhan-xin, WU Min-zhe. Vibration analysis of structure base isolated by sliding [J]. Xi'an Univ. of Arch. &Tech; Natural Science Edition, 1999,31(3):208-210.

[3] 毛利军,李爱群.多层滑移隔震建筑结构的简化模型及分析精度[J].建筑结构学报.2005,26(2):117-123.
MAO Li-jun, LI Ai-qun. The simplified models and their precision for analysis of multi-story sliding isolated structures [J]. Journal of building structures, 2005,26(2):117-123.

[4] 姚谦峰,夏禾.基础滑移隔震结构振动特性分析[J].世界地震工程,2001,17(1):50-55.
YAO Qian-feng, XIA He. Analysis of vibration properties of structures with sliding base isolation [J]. World information on earthquake engineering, 2001, 17(1):50-55.

[5] NICOS Makris, CHANG Shih-Po. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29: 85-107.

[6] 李新乐,朱唏.考虑场地和震源机制的近断层地震动衰减特性的研究[J].工程地质学报.2004,12(2):141-147.
LI Xin-le, ZHU Xi. Attenuation of near-fault ground motions based on site and focal the study mechanism [J]. Journal of engineering geology, 2004,12(2):141-147.

[7] BRAY J D, RODRIGUEZ Marek. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region [J]. Soil Dynam Earthquake Eng. , 2004, 24: 815-828.

[8] MAVROEIDIS G P, PAPAGEORGIOUS A S. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. Bull. Seism. Soc. Am. 2003, 93: 1099-1131.

[9] 刘晓通.滑移隔震结构在近断层地震作用下的能量分析[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
LIU Xiao-tong. The simplified of energy analysis based on sliding base isolation structure under the action [D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. &Tech,2011.

[10] 熊仲明,史庆轩,李菊芳.框架结构基于能量地震反应分析及设计方法的理论研究[J].世界地震工程,2005, 121(2):141-146.
XIONG Zhong-ming, SHI Qing-xuan, LI Ju-fang Theoretical study on seismic response and design method of frame structures with energy method [J]. World earthquake engineering, 2005, 121(2):141-146.

spatial discrete segments of plane frame structure are used to form the investigated lumps. The dynamic equations of the investigated lumps and the relations between interior forces and end displacements have been derived. By applying the dynamic equations and the relations alternately in time domain, the wave-based method was presented for seismic response analysis of plane frame structure. The method can be easily used to solve the problem of structural seismic response considering wave passage effect by using the proposed method. Comparisons of the shear forces of columns with the bending moments of beams are carried out for a plane frame structure respectively subjected to horizontal and vertical seismic excitations. It showed that the effect of wave passage may lead the column shear forces and beam-end bending moments to an increase. Some column shear forces and beam-end bending moments caused by the vertical excitations are even greater than those caused by the horizontal excitations. So seismic wave passage effect should be considered for the seismic response analyses of plane frame structure.

Key words: *plane frame structure; wave-based method; wave passage effect; vertical earthquake*

Biography:JIANG Ying-chun, Candidate for Ph. D., Dalian 116024, P. R. China, Tel: 0086-13889204250, E-mail: yingchun. j@gmail. com

(上接第 309 页)

[11] 杨文星. 单自由度体系非线性地震能量反应分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2002.

YANG Wen-xing. Nonlinear analysis on seismic energy response of SDOF system [D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2002.

[12] 熊仲明, 王佳, 郭瑜. 基于耗能减震结构耗能装置的优化设置的研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(2): 166-171.

XIONG Zhong-ming, WANG Jia, GUO Yu. Research on optimization setting based on passive energy dissipation structural device [J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2011, 43(2): 166-171.

Study on the simplified method of energy analysis based on sliding isolation structure

XIONG Zhong-ming^{1,2,3}, ZHANG Ping-ping¹, WEI Jun^{2,4}, LIU Xiao-tong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of arch. & tech., Xi'an 710055, China;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou 215011, China;

3. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China (XAUAT), Xi'an 710055, China;

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215011, China)

Abstract: A large amount of calculation and complex analysis is involved in the nonlinear seismic response analysis of the multi-DOF shear structure isolation system with the energy method, not ready for use in engineering practice. In order to solve these problems, this paper, through its analysis of free vibration equation, finds an equivalent system to simplify the solution of the isolation system. And the influence of three elements of near-fault ground motion on the total input energy was simply analyzed. Finally, a five-storey framework isolation structure model under the action of earthquake is respectively analyzed by energy method and the simplified calculation method. Compared with the results, it shows the method proposed is rather safe, which also provides the reference for the seismic design of the project.

Key words: *sliding base-isolation; analysis of energy method; earthquake response*

Biography:XIONG Zhong-ming, Professor, Ph. D, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-62663671. E-mail: xiong_zhongming@yahoo. com. cn