

隔震层的滤波效应分析*

张龙飞^{1,2}, 陶 忠¹, 潘 文¹, 王广宇³

(1. 昆明理工大学 土木工程学院, 云南 昆明 650011; 2. 云南震安减震技术有限公司, 云南 昆明 650011;
3. 昆明恒基建设工程施工图审查中心, 云南 昆明 650011)

摘要:从隔震层改变地震动输入特性的角度出发, 采用有限元分析软件 Etabs9.7.2 对某隔震建筑进行弹性时程分析, 对原输入地震动及经过隔震层后的衰减地震动时程进行分析对比得出: 经过隔震层的过滤作用后, 衰减地震动时程的峰值加速度减小到原输入地震动峰值的 $1/4 \sim 1/3$; 衰减地震动时程的反应谱及傅立叶谱幅值均显著减小; 经过隔震层后衰减地震动时程的反应谱平台段显著缩短, 并且衰减地震动时程的中、高频成分含量显著减少, 在隔离地震作用效果上, 隔震层滤波作用与延长结构周期的反应谱原理是等效。

关键词:隔震层; 滤波效应; 地震动时程; 谱分析

中图分类号: T0352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)02-0298-06

0 前言

目前, 国内外已建成的许多隔震建筑在经历了大地震的考验中, 表现了良好的抗震性能(金光辉, 张凌云, 2004)。近年来, 随着国内对隔震技术的大力推广, 隔震技术的应用范围越来越广, 隔震建筑的数量也越来越多, 据云南震安减震技术有限公司 2012 年的不完全统计, 云南省隔震建筑数量已超过 1 000 栋, 占全国隔震建筑总数的 80% 以上。隔震技术已经成为提高建筑物的抗震性能、降低人员伤亡及减少财产损失最有效途径之一(钟阳, 张辉, 2009)。

建筑隔震技术通过在上部结构底部或某高度设置刚度较小变形能力大的隔震装置, 把结构和地面分开, 以减小地震能量向结构传递, 从而减轻地震灾害(曲哲等, 2009)。反应谱理论能很好地解释隔震原理, 即结构通过设置刚度较小的隔震层来延长结构周期, 使得地震作用减小(杜永峰等, 2010)。而从滤波的角度考虑, 滤波原理认为地震动经过侧向刚度较小的隔震层滤波作用后, 衰减成为新的地震动, 隔震层以上楼层的地震响应则是衰减地震动产生的地震响应(刘文光, 2003)。从能量角度讲, 隔震原理就是利用隔震层

滤波作用将不规则、高频地震振动能转换为建筑整体平动能, 从而减少建筑损坏, 保证其使用功能, 以达到提高建筑抗震性能的设计目标(钟阳, 张辉, 2009)。

1 工程概况

本文以昆明市某 8 层混凝土框架结构为基本模型, 该建筑总高度 30.4 m, 等效宽度 38.7 m, 高宽比 0.79, 设防烈度为Ⅷ度, 所在场地类别为Ⅱ类, 地震分为 3 组, 特征周期 $T_g = 0.45$ s, 上部结构基本周期见表 1, 本工程使用有铅芯橡胶支座共 104 个, 其中 62 个 LRB600, 42 个 LRB700, 三维模型见图 1, 支座布置图见图 2。

表 1 上部结构基本周期

Tab. 1 Basic period of the upper structure

	T_1	T_2	T_3
结构基本周期	1.294	1.261	1.146
平动与扭转系数	0.88+0.00+0.11	0.01+0.99+0.00	0.11+0.00+0.89

本工程运用 Etabs9.7.2 软件对其进行设防地震作用下弹性时程分析, 隔震分析时的地震动是根据《建筑抗震设计规范》(GB5011—2010) 要求所选取, 选用 1 条人工地震动加速度时程, 2 条天然

* 收稿日期: 2013-10-10.

基金项目: 钢结构新型外套管式节点专项实验研究(kkk0201206090)及防屈曲支撑减震技术地震模拟振动台实验(kkf0201406005)联合资助。

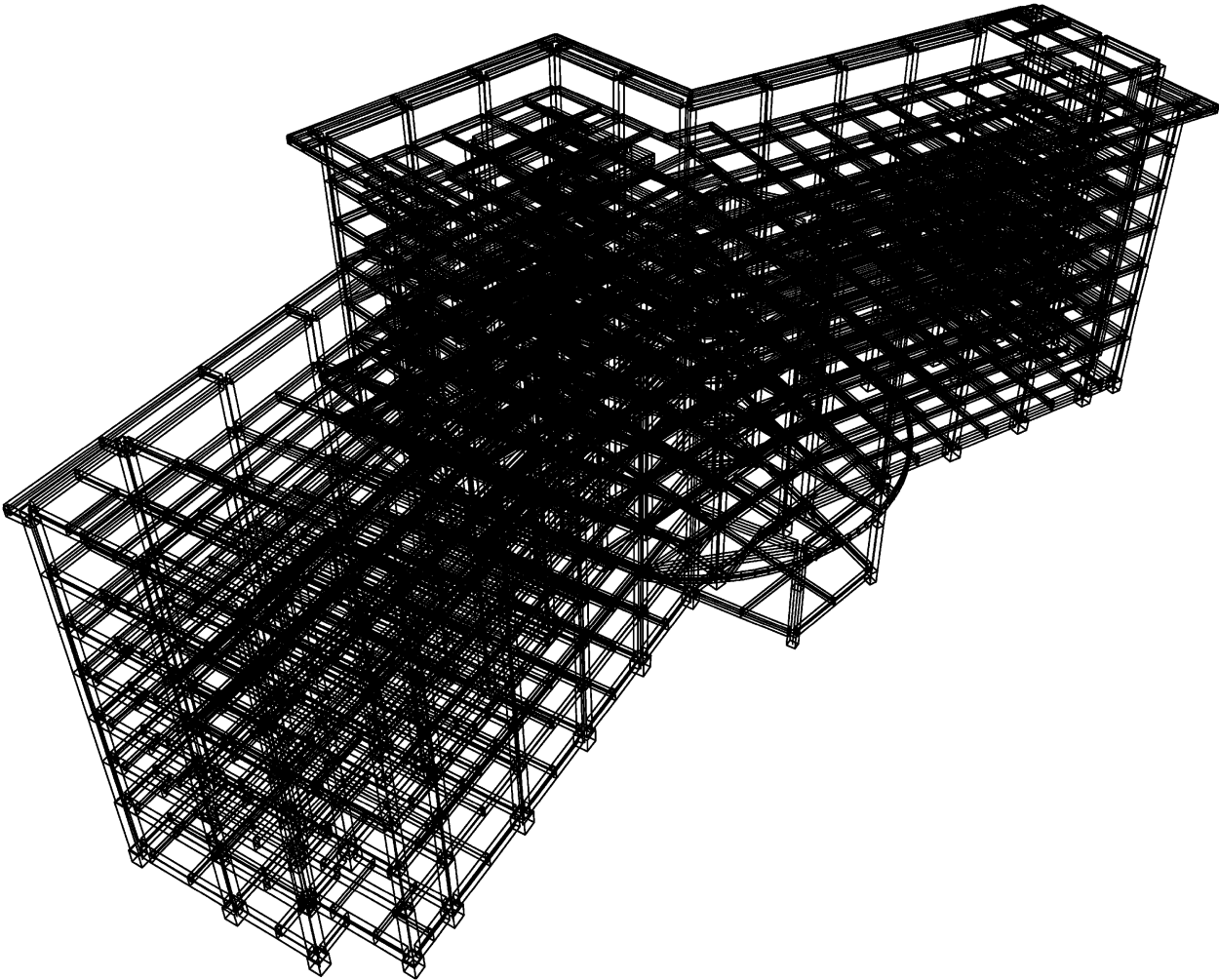


图 1 结构三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the structure

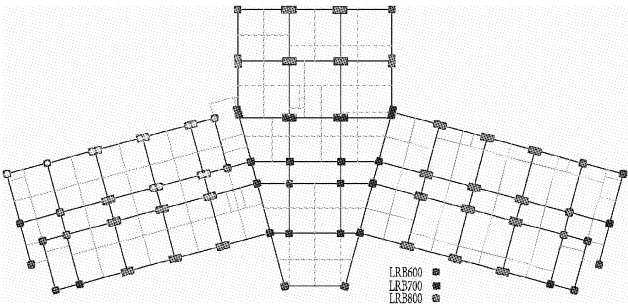


图 2 结构隔震层平面布置

Fig. 2 Layout of isolation layer of the structure

地震动加速度时程。对于上部结构模型，在设防地震作用时，水平地震动加速度时程最大值取 200 gal，每条地震动时程计算结果所得底部剪力不小于振型分解反应谱法计算结果的 65%，不大于 135%，3 条地震动时程计算结果所得底部剪力平均值不小于振型分解反应谱法计算结果的 80%，不大于 120%；

多条地震动时程曲线应满足在统计意义上相符的条件，并且各条地震动时程应满足持时的要求。经验证：所选用的 3 条地震动时程均满足《建筑抗震设计规范》（GB5011—2010）要求。

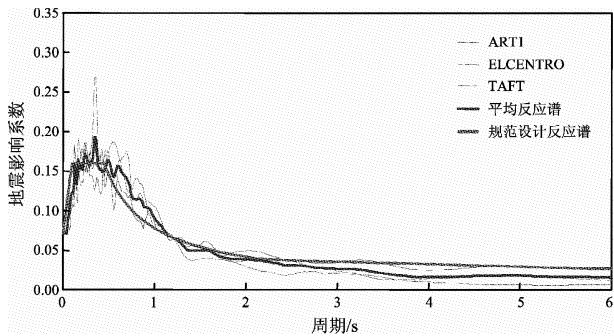


图 3 原时程反应谱和设计反应谱

Fig. 3 Response spectrum of initial time history and the design response spectrum

2 衰减地震动时程

运用 Etabs9.7.2 软件对隔震结构在设防地震作用下进行弹性时程分析, 水平地震动加速度时程最大值取 200 gal, 分别提取 3 条原地震动加速度时程在隔震层质心处的绝对加速度时程 (即衰减地震动时程), 原地震动时程与衰减地震动时程加速度曲线见图 4。由图可看出, 衰减地震动时程的加速度值均小于同时刻原地震动时程加速度值,

由表 2 可知: 3 条地震动时程的峰值加速度均得到有效衰减, 衰减地震动时程峰值加速度为原地震动时程的 1/4 ~ 1/3。

表 2 时程峰值加速度衰减对比

Tab. 2 Attenuation comparison of peak acceleration of the time history

地震动时程	ART1	ELCENTRO	TAFT
原地震动时程峰值加速度/gal	200	200	200
衰减地震动时程峰值加速度/gal	54.4	70.1	62.0
衰减比例	0.27	0.35	0.31

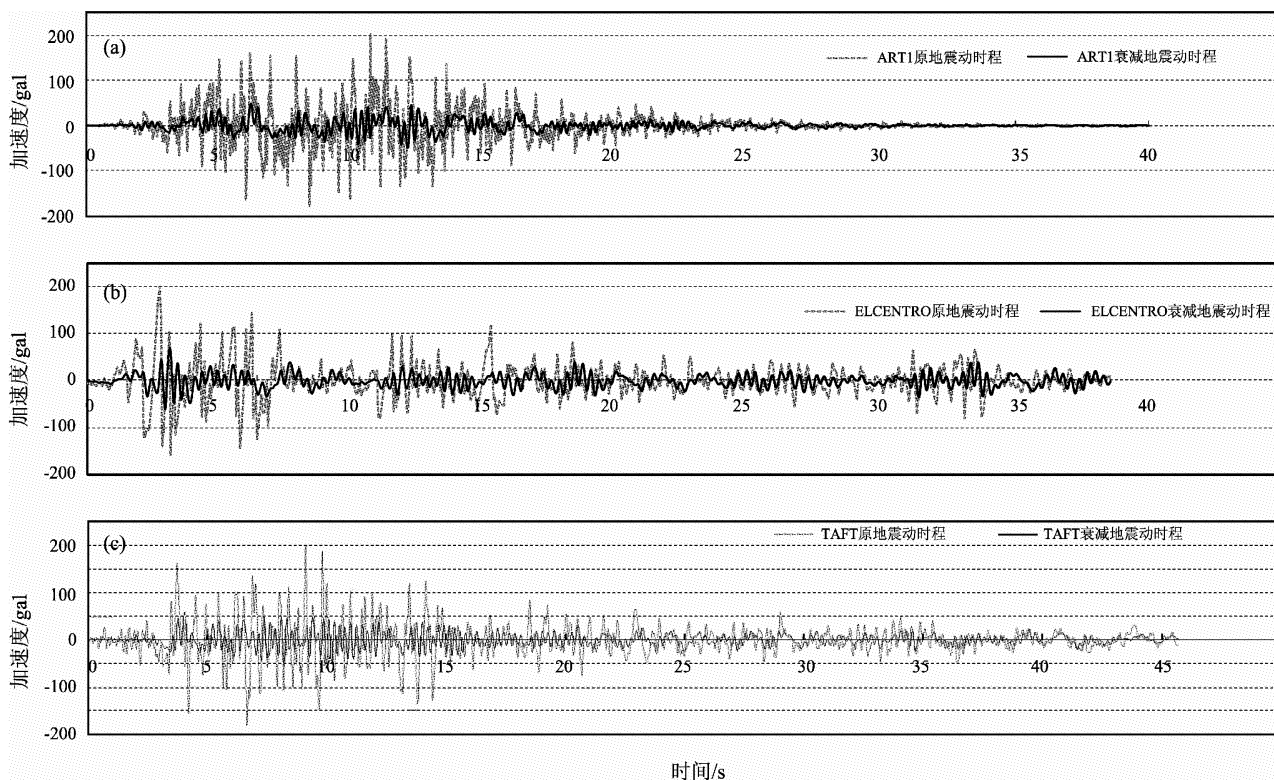


图 4 原地震动时程与衰减地震动时程加速度曲线

(a) ELCENTRO; (b) ART1; (c) TAFT

Fig. 4 The acceleration curves of initial and filtrated ground motion time history

3 谱分析

凡是表征地震动中振幅与频率关系的曲线都统称为频谱。本文对原地震动时程及衰减地震动时程作反应谱和傅立叶谱分析 (胡聿贤, 2009)。反应谱利用一个单自由度过滤器的反应间接反映地震的频谱特性, 是某一地震作用下不同动力特性的单自由度结构反应最大值的集合 (A. B. M. Saiful Islam *et al*, 2013)。反应谱并没有

反映具体的结构特性, 只反映了地震动的特性, 即反应谱曲线的形状反映了地震动不同频率成分的相对关系。傅立叶谱则是利用傅立叶分析对地震动时程进行分解的结果, 其基本原理是任意非周期性的复杂函数均可以表示成简单周期函数 (比较常用的周期函数为三角函数) 的组合, 由此可以获得傅氏幅值谱和傅氏相位谱, 两者合称傅立叶谱 (熊辉等, 2011)。幅值谱幅值谱反映了地震动能量在频率域的分布, 即显示了不同频率的正弦波所携带能量的多少 (Xu *et al*, 2012)。

本文研究针对上部混凝土框架结构, 因此取阻尼比 $\xi = 0.05$, 将上述原地震动时程及衰减地震动时程进行反应谱及傅立叶谱分析, 6 条地震动时程的反应谱曲线图如图 5 所示, 原地震动时程平均反应谱及衰减地震动时程平均反应谱曲线如图 6 所示, 6 条地震动时程的傅立叶谱见图 7。

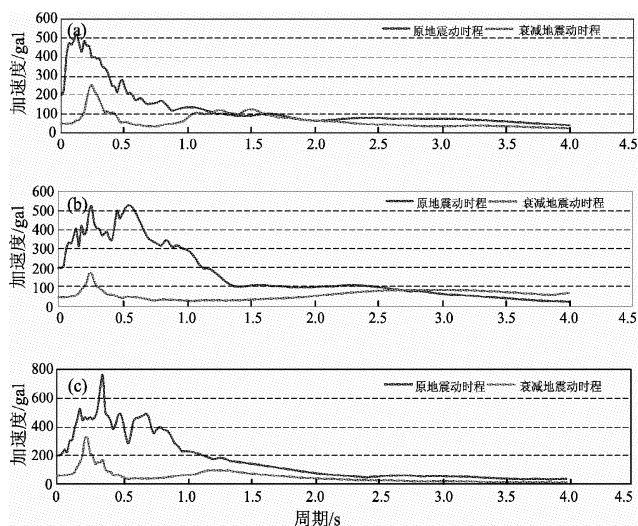


图5 原地震动与衰减地震动时程的反应谱

(a) ART1; (b) ELCENTRO; (c) TAFT

Fig. 5 Response spectrum of initial and filtrated ground motion time histories

由图 5 可知: 经过隔震层的滤波作用后, 3 条地震动时程的反应谱特性发生了较大变化, 衰减地震动时程反应谱平台段显著变短, 反应谱幅值在大多数中、短周期点上均有不同程度的衰减。而在长周期段上隔震层对 3 条原地震动时程的衰减作用不明显, 甚至放大, 这与延长结构周期的隔震原理得到同样结论, 即上部结构基本周期不宜太长, 否则隔震的效果不理想。

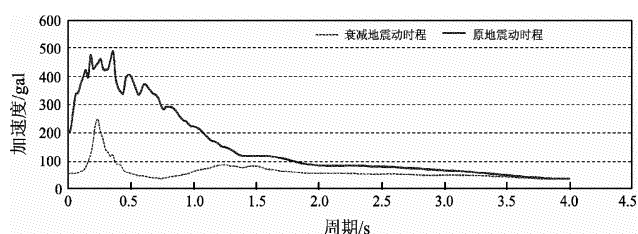


图6 原地震动与衰减地震动时程平均反应谱

Fig. 6 The average response spectrum of initial and filtrated ground motion time histories

由图 6 可以看出, 衰减地震动时程的平均反应谱幅值的平台段显著变短, 对应于原地震动时程反应谱的上升、平台和部分曲线下降段 (中、短周期), 衰减地震动时程反应谱显著减小, 隔震层的衰减作用明显; 而对应于原地震动时程部分曲线下降段和整个直线下降段 (长周期段), 衰减地震动时程反应谱减小不明显, 部分长周期段甚至大于原地震动时程反应谱, 隔震层的衰减作用不明显。在上部结构基本周期所对应的反应谱阶段, 衰减地震动时程的反应谱幅值远远小于原地震动时程反应谱幅值, 因而隔震后上部结构地震作用远小于隔震前原结构。当上部结构的基本周期处于长周期段时, 上部结构的地震反应衰减不明显, 从宏观来看上部结构设计时, 结构的基本周期应尽量处于中、短周期段, 当上部结构的基本周期超过 1.8 s 时隔震效果将不明显。

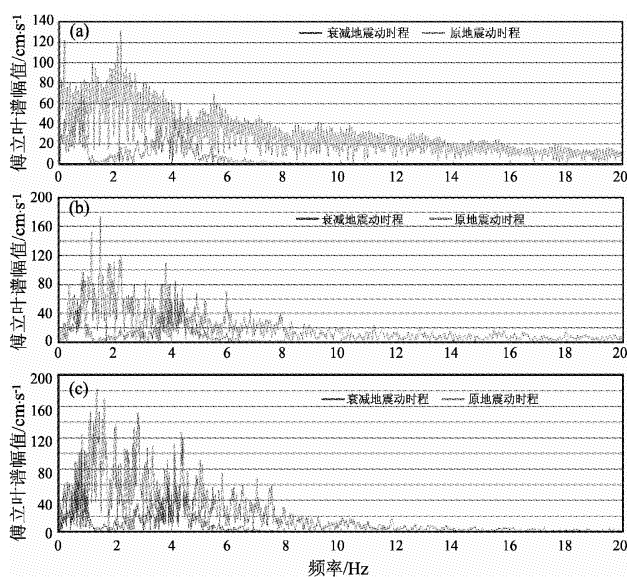


图7 原地震动与衰减地震动时程傅立叶谱

(a) ART1; (b) ELCENTRO; (c) TAFT

Fig. 7 Fourier spectrum of initial ground motion and filtrated time histories

通过图 7 可以看出, 3 条衰减地震动时程傅立叶谱幅值在绝大多数频段均得到有效衰减, 其中的中、高频成分含量显著减少, 且卓越周期均发生了改变。衰减地震动时程的卓越周期对应频段较窄, 因而其反应谱平台段显著缩短, 对应长周期段的低频傅立叶幅值衰减作用不明显, 因而当上部结构基本周期处于长周期段时, 地震作用衰

减不明显。上部结构基本周期对应频段的傅立叶幅值得到有效衰减,地震作用也得到有效衰减,达到大大降低地震作用的隔震效果。

4 结论

本文通过对实际工程进行弹性分析,得到原地震动时程经过隔震层衰减作用后的 3 条衰减地震动时程,进而对原地震动时程及衰减地震动时程进行反应谱和傅立叶谱分析,从隔震层改变原地震动时程频谱特性的角度进行分析得到以下结论:

(1) 经过隔震层滤波作用后,衰减地震动时程各个时刻的加速度值均显著降低,峰值加速度衰减至原地震动时程的 $1/4 \sim 1/3$ 。

(2) 经过隔震层滤波作用后,衰减地震动时程较原地震动时程反应谱平台段显著缩短,长周期段隔震层的衰减作用不明显,甚至放大,为保证隔震效果,隔震设计时上部非隔震结构基本周期应避免在长周期段。

(3) 经过隔震层滤波作用后,衰减地震动时程的卓越周期对应频段变窄,其傅立叶谱幅值在绝大多数频段均得到有效衰减,并且衰减地震动时程的中、高频成分含量显著减少,地震作用显著减弱。

(4) 从隔震层改变原地震动时程频谱特性的角度进行分析,在隔离地震作用效果上,隔震层滤波原理与延长结构周期的反应谱原理是等效的。

综上所述,输入到隔震建筑中的原地震动时

程经过隔震层的滤波作用后,衰减为衰减地震动时程。衰减地震动时程与原地震动时程相比,衰减地震动时程的峰值加速度、反应谱幅值及傅立叶谱幅值显著减小,且衰减地震动时程的中、高频成分含量显著减少,因此经过隔震层的过滤作用,上部结构的地震作用显著降低,达到隔震效果,保障上部结构的安全性。

参考文献:

- 杜永峰,李慧,吴忠铁,等. 2010. 近场多维地震激励的隔震结构高宽比限值分析研究[A]//中国计算力学大会'2010(CCCM2010)暨第八届南方计算力学学术会议(SCCM8)论文集[C]. 北京:中国力学学会.
- 胡聿贤. 2009. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,91-100.
- 金光辉,张凌云. 2004. 隔震设计在高层中的应用[J]. 建筑科学,20(4):19-21.
- 刘文光. 2003. 橡胶支座力学性能及隔震结构地震反应分析研究[D]. 北京:北京工业大学.
- 曲哲,叶列平,潘鹏. 2009. 高层建筑的隔震原理与技术[J]. 工程抗震与加固改造,31(5):58-63.
- 熊辉,李正良,晏致涛,等. 2011. 地震反应谱、功率谱及傅里叶谱关系探讨[J]. 四川建筑科学研究,37(2):171-179.
- 钟阳,张辉. 2009. 隔震结构设计问题的研究[J]. 工程抗震与加固改造,31(4):87-110.
- A. B. M. Saiful Islam, Raja Rizwan Hussain, Mohd Zamin Jumaat, *et al.* 2013. Nonlinear dynamically automated excursions for rubber-steel bearing isolation in multi-storey construction[J]. Automation in Construction,30(1):265-275.
- GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].
- XU Z. D., HUANG X. H., GUO Y. F., *et al.* 2012. Study of the properties of a multi-dimensional earthquake isolation[J]. Journal of Constructional Steel Research,88(1):63-78.

Analysis on Filtering Effect of Isolation Layer

ZHANG Long-fei^{1,2}, TAO Zhong¹, PAN Wen¹, WANG Guang-yu³

(1. Faculty of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 6500113, Yunnan, China)

(2. Yunnan Zhen'an Seismic Isolation Technologies Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan, China)

(3. Kunming Hengji Building Construction Drawing Inspection Center, Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract

Basing on the theory of isolation layer could improve the input characteristics of ground motion, we analyze a isolated building by use of the finite element analysis software Etabs9.7.2 in elastic time history method, and compare the time history of the original ground motion (THOGM) with the time history of ground motion attenuation (THGMA) after the filtering of the isolation layer. The result shows that after the filtration function of isolation layer, the peak acceleration of THGMA reduces $1/4 \sim 1/3$ of that of THOGM, the response spectrum and Fourier spectrum amplitude of THGMA is significantly decreased, the platform segment of response spectrum of it is shortened, and the middle-high frequency component of it significantly decreased. In the effect of isolation of seismic action, the filtering effect of isolation layer and the response spectrum principle of increasing prolong the structure cycle is equivalent.

Key words: isolation layer; filtration function; ground motion time history; spectral analysis