

[文章编号] 1002-8412(2009)05-0058-06

# 高层建筑的隔震原理与技术

曲 哲,叶列平,潘 鹏(清华大学土木工程系,北京 100084)

[摘 要] 隔震技术目前正逐渐应用于高层建筑。但对于高层建筑,延长结构周期带来的抗震性能改善并不显著,而分析结果表明,隔震技术仍可以显著降低结构的绝对加速度响应。本文以线弹性动力时程分析和反应谱法为基础,从延长结构周期原理与隔震层滤波原理两方面分析了建筑隔震的减震效果。分析结果表明,在现有基于承载力抗震设计框架下,两种原理的分析结果是等效的,而滤波原理能够更加科学的解释隔震技术在降低结构绝对加速度响应方面的减震机理,有助于从基于性能设计更加全面的体现隔震技术的优势。在充分认识隔震原理的基础上,进一步讨论了高层建筑隔震需解决的技术问题,并介绍了日本高层隔震建筑的应用。

[关键词] 隔震;高层建筑;滤波原理;反应谱;基于性能设计

[中图分类号] TU352.1 [文献标识码] A

## Theory and Techniques of Seismic Isolation in High-rise Buildings

Qu Zhe, Ye Lie-ping, Pan Peng (Dept. Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Seismic isolation has been applied to more and more high-rise buildings in the recent years. Its benefit of mitigating the seismic response by increasing the structure's period is, however, not as significant as in low-rise buildings. On the other hand, the analysis results show that the seismic isolation is quite effective in reducing the absolute acceleration response even for high-rise buildings. Based on both linear-elastic dynamic and response spectrum analyses, two interpretations of base isolation building structures, the period elongation and the ground motion filtration, are discussed and compared. These two interpretations are proved equivalent for current force-based seismic design procedures, while the latter is much more reasonable in explaining the reduction effect of absolute acceleration and hence better illustrates the advantages of seismic isolation in accordance with philosophy of the performance-based earthquake engineering. Some technical problems for high-rise base isolation building are also discussed. And some applications of high-rise base isolation buildings in Japan are also introduced.

**Keywords:** seismic isolation; high-rise building; filtration theory; response spectrum; performance based design

### 1 引言

建筑隔震减震技术是通过在建筑物底部或某高度处设置侧向刚度较小且变形能力大的隔震装置,以减小地震对上部楼层的能量输入,从而减小上部楼层的地震响应。尽管早在一百多年前,人类就曾利用滚木、球和沙等作为隔震装置实现了建筑隔震减震<sup>[1]</sup>,但直到约 30 年前夹层橡胶隔震垫发明后,现代建筑隔震技术才开始在实际工程中逐渐得到推广应用。目前,隔震建筑已经被地震国家广泛接受。日本是目前世界上拥有隔震结构最多的国家,1995 年神户大地震后每年约有 150 栋新建隔震结构。美

国也有大量的隔震结构,主要集中在加州地区。除了日本和美国,意大利和新西兰也拥有隔震结构,一些发展中国家,如智利、印尼和亚美尼亚等,也新建了具有示范意义的隔震结构<sup>[1]</sup>。我国自 1993 年在汕头建成首幢橡胶垫隔震建筑以来,橡胶垫隔震装置已先后在西昌、广州、太原、杭州、北京等地的 500 余项工程中得到应用<sup>[3-4]</sup>。

建筑结构采用隔震措施后,与相同的非隔震结构相比,将具有较长的周期(通常是原周期的 2~3 倍)。根据反应谱理论,层数较少的非隔震结构周期较短,地震作用较大,而隔震建筑的周期明显延长,使得地震作用显著减小。这是目前对隔震建筑原理的一般解释,并由此认为隔震建筑一般适用于层数不多的建筑。但近年来国外在不少高层建筑中也采

[收稿日期] 2009-01-19

[基金项目] 长江学者和创新团队发展计划(IRT0736)

用隔震技术,我国也开始高层建筑隔震的研究和应用<sup>[5-7]</sup>。但传统的基于延长周期的隔震原理似乎无法解释隔震技术在高层建筑中应用的合理性,而实际高层建筑隔震的动力分析结果又表明高层建筑隔震仍具有明显的减震效果<sup>[8]</sup>。隔震技术在高层建筑中应用的合理性来源于多个方面,其中比较主要的方面在于隔震层同时也是绝好的消能减震层,结构的大部分变形集中在隔震层,使得隔震层中阻尼器的消能作用具有更高的效率。除此之外,即使只考虑隔震本身,高层建筑隔震仍具有其他优势,主要体现在上部结构绝对加速度响应的降低。而延长周期原理不能直观的反映高层建筑隔震在降低绝对加速度响应方面的效果。为此,本文以线弹性动力时程分析和反应谱法为基础,分别从延长结构周期隔震原理和隔震层滤波原理两个方面对高层隔震建筑的减震效果进行分析对比,得到了在现有基于承载力抗震设计框架下,两种原理具有一致性的结论,同时滤波原理能够更加直观的评价隔震技术在降低上部结构绝对加速度响应方面的作用,有助于从基于性能设计方面更加全面的体现隔震技术的优势。在高层建筑隔震原理得到论证的基础上,实现高层建筑隔震的关键就主要是技术问题,本文对此也进行了讨论。

本文采用美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 开发的 OpenSEES 程序,对线弹性多自由度层模型的高层隔震结构进行时程分析,计算使用 1994 年 Northridge 地震中 N Hollywood 台站的地面运动记录,该地震波的峰值加速度  $PGA = 271gal$ ,峰值

速度  $PGV = 22.2cm/s$ ,峰值位移  $PGD = 11.69cm$ 。

## 2 隔震原理

在隔震建筑的工程应用中,通常会在隔震层中增设阻尼消能减震装置,这主要是为了减小隔震层的位移响应,防止隔震结构与周围物体碰撞。从理论上来说,隔震层增加阻尼效果与隔震原理属于不同的范畴,阻尼的变化对于隔震原理解释没有影响。为此,本文分析中不考虑隔震层增加阻尼,假设包括隔震层在内的整个结构的阻尼比为 5%。

算例取自一个 10 层多自由度层模型,各质点质量均为 79.2kg,上部结构层刚度均为 19.2N/mm,隔震层刚度为 3.3N/mm,隔震前一阶周期  $T_1 = 2.7s$ ,隔震后一阶周期  $T_1 = 4.0s$ 。

延长周期原理是目前对隔震结构原理通常采用的解释,即隔震建筑因设置了侧向刚度较小的隔震层,隔震后结构的基本周期增大很多,相应的加速度反应谱值往往远小于隔震前,即地震作用减小了。然而对于高层建筑,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。对于上述算例,由图 1(a) 中 Northridge 波的加速度反应谱可见,隔震前后一阶周期的加速度反应谱值变化不大,分别为 97gal 和 81gal,按振型分解反应谱法计算得到的隔震前后结构的基底剪力分别为 692.4kN 和 574.3kN,即由反应谱理论计算得到隔震后结构的地震作用与非隔震结构的地震作用相差不大。这时延长周期原理似乎不能很好的解释高层隔震建筑的减震效果。然而时程计算结果显示,对于长周期的高层建筑,隔震

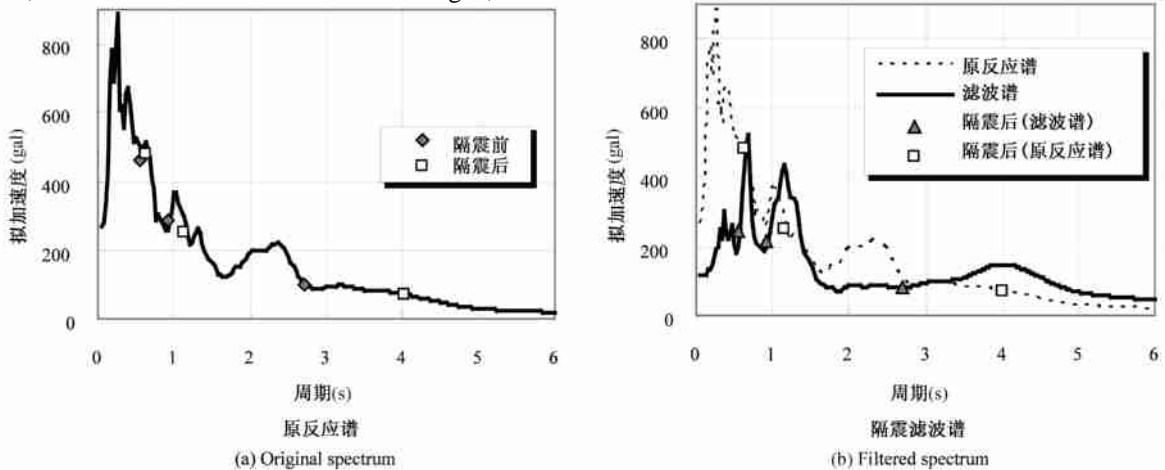


图 1 原地震波的加速度反应谱和滤波后加速度反应谱

Fig. 1 Acceleration spectra of the original ground motion record and the record filtered by the isolation layer

结构仍有比较显著的减震效果。为此,以下从隔震层滤波原理给予说明。

滤波原理认为地震波经过侧向刚度较小的隔震层滤波后,衰减为新的输入波,隔震层以上楼层的地震响应,可以认为是经过隔震层滤波后的新的输入波使上部结构产生的响应。在设计隔震层以上楼层时,可以采用现有的各种方法,只需把原来的地震波换成滤波后的新的输入波即可,滤波后的新的输入波的反应谱见图1(b)中的“滤波谱”。“滤波谱”的确定方法是,先对隔震结构进行整体动力时程分析,得到隔震层顶面的绝对加速度时程,再以该加速度时程作为新的输入波进行谱分析,得到的反应谱即是“滤波谱”。一般来说,由于上部结构刚度比隔震层刚度大很多,也可采用以隔震层为弹簧、上部结构为质量的单自由度模型来近似确定滤波后的新的输入波。

对于隔震建筑,延长周期原理与滤波原理的着眼点不同。前者着眼于隔震层对整体结构动力特性的改变;后者则着眼于隔震层对地震地面运动输入的改变。以下基于这两种隔震原理,分别采用振型分解反应谱法和动力时程法对某10层多自由度层模型的地震动响应进行分析。对非隔震结构,振型分解反应谱法计算时采用前3阶振型参与组合,振型参与质量达到总质量的97.0%。对于隔震结构,当按延长周期原理分析时,根据原反应谱计算,采用包括隔震层在内的全部结构的前4阶振型参与组合,振型参与质量达到总质量的99.9%;当按滤波原理分析时,根据滤波谱计算,采用隔震层以上结构的前3阶振型参与组合,振型参与质量达到总质量的97.0%。计算分析结果见图2,由图可知:

(1) 图2(a)表明,无论是非隔震结构,还是隔震结构,振型分解反应谱法得到最大位移响应计算结果与时程分析结果基本一致,这表明了振型分解反应谱法的准确性。

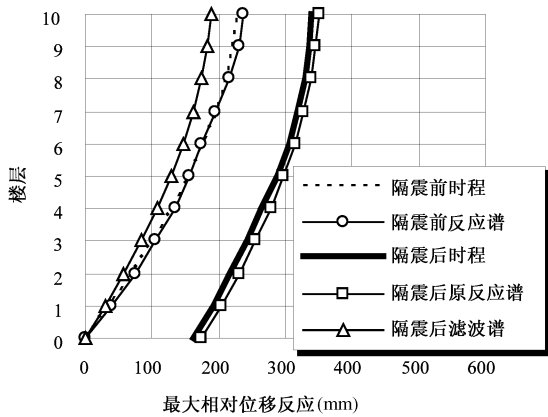
(2) 由图2(a)可以看出,对于隔震结构,用原地震波(或原反应谱)与滤波(或滤波谱)计算结果的不同之处仅在于相差了隔震层的位移,即用原地震波(或原反应谱)计算得到的结构位移包括了隔震层位移,而用滤波(或滤波谱)计算得到的只是上部结构的位移。如扣除隔震层位移,则两种方法计算得到上部结构的位移响应结果基本一致(见图2(b)),这表明两种隔震原理的分析结果具有一致性。

(3) 图2(c)显示了用振型分解反应谱法和动力时程分析计算得到的隔震前后层地震力分布(层地震力  $F_i = m_i a_i$ , 其中  $m_i$  为第  $i$  层的质量,  $a_i$  为地震动产生的第  $i$  层绝对加速度)。可见,因周期延长效果不显著,隔震后结构的层地震力略有减小,同时对于隔震结构,且用原反应谱与用滤波谱的计算结果基本一致。在图2(c)中还可以看出,振型分解反应谱法得到的层地震力与时程分析结果的平均值基本一致,但隔震前结构的时程分析得到的地震力分布极不规则,某些楼层的地震力与反应谱方法的分析结果相差很大;而隔震后结构的时程分析得到的层地震力分布相对较为规则,与反应谱方法的分析结果基本一致。

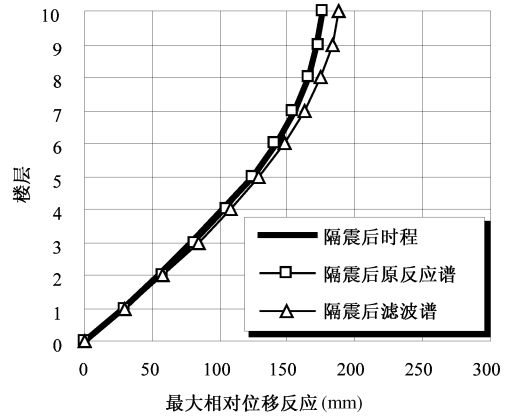
(4) 由图2(d)可以看出,隔震后结构各层的层剪力有所减小。层剪力是结构抗震承载力设计的依据,对非隔震结构,由振型反应谱法得到的层剪力小于时程分析结果,且误差较大;而隔震后由振型反应谱法得到的层剪力与时程分析结果基本一致。因此,图2(c)和图2(d)的结果表明,对于隔震结构,反应谱法的分析结果更准确,也即隔震结构的地震响应的离散性会显著减小,并且计算结果具有足够的可靠性。

(5) 图2(e)为时程分析得到的隔震前后结构楼层最大绝对加速度响应分布的对比,可见隔震结构明显小于非隔震结构。这表明,即使隔震结构对应第一周期的加速度谱值没有明显变化,但经隔震层滤波后,可有效降低上部结构的最大绝对加速度响应,这不但有助于保证建筑物各种设备仪器的正常工作,减小大震下建筑内部物品的损坏和经济损失,同时对于保障人员安全也具有重要的意义。日本的实际震害表明,地震中建筑物内及其周边的人员的安全受到多方面的威胁,而建筑物倒塌只是其中之一。室内家具、设备的倾覆往往也是造成人员伤亡的重要原因,而这主要与结构的绝对加速度响应有关<sup>[9]</sup>。

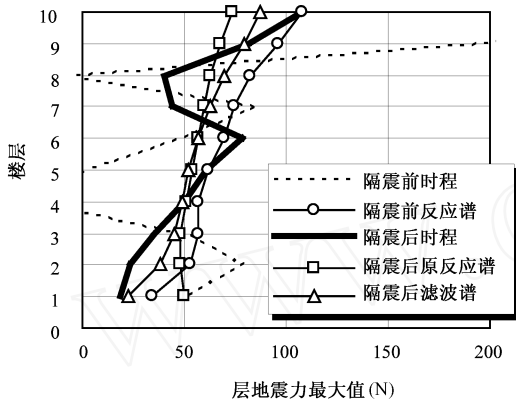
延长周期原理的反应谱法关注的是地震力的减小,没有给出结构最大绝对加速度响应的减小。其原因是,振型分解反应谱法给出的地震力是由层间最大位移响应得到,并以层间最大位移响应确定层间剪力,由此进行结构抗震受力和结构构件的承载力设计,属于基于承载力设计。而结构最大绝对加速度响应与层间最大位移响应并非在同一时



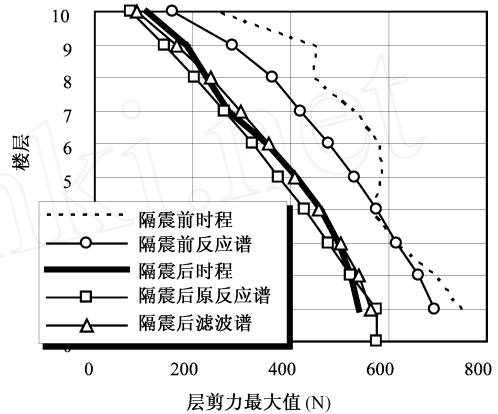
最大相对位移反应(mm)  
 (a) 隔震前、后的最大位移响应  
 (用原反应谱计算结果未扣除隔震层位移响应)  
 (a) Peak displacement response (including the deformation of the isolation layer)



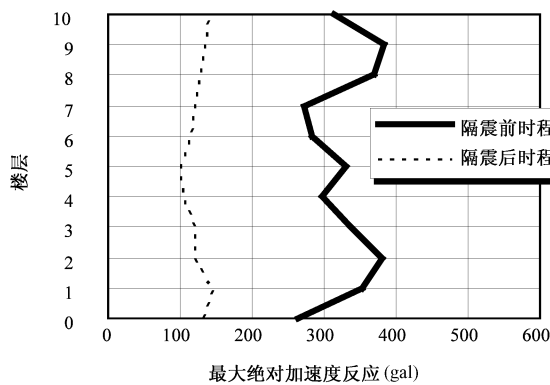
最大相对位移反应(mm)  
 (b) 隔震前、后的最大位移响应  
 (用原反应谱计算结果扣除隔震层位移响应)  
 (b) Peak displacement response (excluding the deformation of the isolation layer)



层地震力最大值(N)  
 (c) 隔震前后的层地震力最大值  
 (c) Peak earthquake force



层剪力最大值(N)  
 (d) 隔震前后的层剪力最大值  
 (d) Peak story shear force



最大绝对加速度反应(gal)  
 (e) 隔震前后的楼层最大绝对加速度响应  
 (e) Peak absolute acceleration response

图 2 隔震前后结构在 Northridge 波作用下的响应

Fig. 2 Structural response to the ground motion of Northridge record before and after isolated

刻。按结构最大绝对加速度响应确定的惯性力会远大于按层间最大位移响应确定的地震力,但以结构

最大绝对加速度响应确定的惯性力作为地震力得到的结构构件受力往往并不是最大。因此,基于承

载力设计的延长周期原理反应谱法,没有给出结构的最大绝对加速度响应,从而不能更好的体现隔震结构在加速度响应方面的减震效果。

由于高层建筑结构本身的周期已较长,采用隔震技术后,高层建筑结构的周期延长不如中低层建筑结构显著,从传统基于承载力的抗震设计方法进行隔震结构设计计算,可能无法体现隔震效果。尽管如此,与非隔震高层建筑相比,高层建筑隔震仍具有以下优点:

(1) 由于隔震层的滤波效应,结构的振动模式易于控制,地震响应计算结果更为可靠;

(2) 由于隔震建筑特殊的变形模式,隔震层中的耗能装置集中耗散地震输入能量,有利于结构减震控制的实现,并有利于避免和减小上部结构的损伤;

(3) 隔震结构楼层的最大绝对加速度响应明显小于非隔震结构,这有助于保证建筑物内的舒适度以及精密仪器的正常工作,更容易实现基于性能设计的目标要求。

由于目前关于结构最大加速度响应的实用计算方法还缺乏足够的研究,同时由于基于包括结构加速度响应在内的性能化设计方法也未得到普遍采用,因此在一定程度上对在高层建筑中推广隔震结构造成困难。发展和推广隔震结构,除按传统的基于承载力(延长周期原理)设计方法提出相应的设计目标外,还应从性能化角度提出设计目标,如要求给出结构的加速度响应限值,在这个目标上比较,将会更显著的突出隔震结构的优势。

### 3 高层建筑隔震应用的技术要求

由以上分析可知,高层建筑采用隔震技术后,虽然在基于承载力设计的框架下在减小地震力方面的效果不是很显著,但仍可显著减小楼层最大绝对加速度,因此发展高层建筑隔震仍然有其理论依据,实现高层建筑隔震不是理论问题,而是需要解决其实际技术问题。与普通中低层隔震建筑相比,实现高层建筑隔震的技术要求主要在于:

(1) 非隔震高层建筑结构的周期本身已较长,而根据前述隔震结构的延长周期原理,为取得一定的减小地震力的隔震效果,隔震高层建筑的隔震层周期需更大,也即隔震层的层刚度应设计得更小,因此隔震垫的数量不能太多。

(2) 高层建筑高度大,总体重量大,而因隔震垫设置数量限制,势必导致单个隔震垫承受的压力较

大。

(3) 高层建筑在地震作用下还会产生较大的倾覆力矩,因此可能抵消重力影响而使边柱受拉,使得布置在边柱下面的隔震垫也可能受拉,因而需要隔震垫具有一定的抗拉能力。

为满足上述高层建筑隔震的技术要求,其隔震层的设计比中低层隔震建筑有更大的难度,一般采用数量少、大直径、且尽量布置的周边的隔震垫方案。数量少是为了控制隔震层的侧向刚度;大直径一方面是数量少的结果,另一方面是可获得较大的受压承载力,而隔震垫受压越大也越有利于避免和减小隔震垫出现拉力;尽量布置在周边也是数量少的必然结果,这就使得隔震层上部楼层结构的跨度增大,增加了上部楼层结构的设计难度。此外,因隔震层刚度小,隔震层层间位移的控制难度也比中低层隔震建筑的难度有所增大。

随着隔震技术的进步和发展,国外已有在高层建筑中应用隔震技术的成功实例,特别是在日本,高层建筑隔震技术已经得到了越来越广泛的应用。根据不完全统计,近年来日本新建的隔震结构中有1/3高于40m,最高的达到60m以上。而且,采用隔震建筑的高宽比也明显增加,1995年以前,高宽比多数小于1.0,只有少数几栋建筑大于2.0;1995年后,40%的隔震建筑的高宽比大于2.0,10%在3.0~5.0之间。图3给出了1995年~2000年全日本新建隔震建筑结构的高宽比分布。

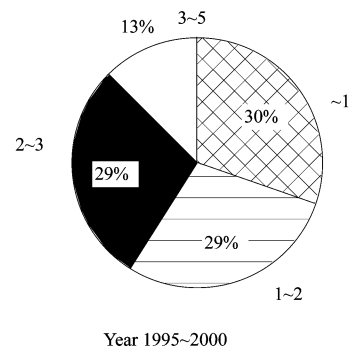


图3 隔震建筑结构的高宽比

Fig. 3 Aspect ratios of isolated building structures

此外,日本部分高层隔震建筑也经受了地震考验。2001年3月24日,日本爱媛县松山市内一栋42.24m高的隔震住宅遭遇了日本震度5度的地震(相当于中国的烈度7度左右)。震后研究人员对该住宅中居民进行的调查得出以下结果:(1)多数居民

认为自己感到的地震只有 3~4 度,明显小于实际震度;(2)半数左右的人认为在地震中没有感到过多的不舒适;(3)多数居民没有听到隔墙和天花板发出声响;(4)所有的居民家中都没有发生家具倾倒的情况。

2001 年 1 月至 2004 年 9 月,日本一栋 64.05m 高的隔震住宅经受了一系列地震的作用。基础处最大加速度为  $0.4 \sim 103\text{cm/s}^2$ 。根据观测结果,在地震较小(PGA 小于  $10\text{cm/s}^2$ )时,首层的加速度放大系数约为 2.0,而顶部达到 3.5~4.0 倍。在地震较大(PGA 大于  $40\text{cm/s}^2$ )时,首层和顶层的加速度差别不大,加速度放大系数均小于 1.0。可见隔震的效果非常明显。

2003 年 9 月 26 日日本十冲胜发生了 M8 级的地震,强震持时约 40s,距震中 266.4kg 札幌市内日本震度为 4 度(大概相当于中国的 7 度)地区的一栋高 64.2m 的隔震结构,其隔震层加速度较大,隔震效果不明显。这是因为,该结构基础处的地面运动加速度时程对应的卓越周期约为 3.0~4.0s,与隔震结构的隔震层发生 50%应变时对应的结构周期 3.0s 非常接近。由此可见,由于高层隔震建筑隔震层刚度较小,对长周期分量较多的远场地震,应注意其适用性。

#### 4 结论

本文分别从周期延长原理和隔震层滤波原理两个方面阐述了高层建筑物隔震的原理。从分析结果可以看出,隔震效果主要来源于以下几个方面:

(1)当隔震后结构周期显著大于非隔震结构周期、且结构处于硬土地时,按层间剪力计算的地震力,隔震建筑显著小于非隔震建筑。通常对于中低层隔震建筑,这种减震效果显著;而对于高层建筑,尤其是对处于软土地上的高层隔震建筑,由于隔震后结构周期比非隔震结构周期无显著延长,这种减震效果并不十分显著。

(2)对于隔震结构,反应谱法的计算结果与时程分析结果吻合程度好于非隔震结构。

(3)无论是中低层建筑隔震,还是高层建筑隔震,上部结构的最大绝对加速度响应均显著小于非隔震建筑。这是在高层建筑中采用隔震技术的主要优势之一。

由于目前现行结构抗震设计属于基于承载力设计,仅关注按层间剪力计算的地震力,这一设计方法无法体现楼层最大绝对加速度的隔震效果。因此,

应尽快发展基于性能的隔震建筑设计方法,主要工作之一是研究隔震建筑绝对加速度响应的计算方法。滤波原理可以直观的解释隔震技术对于结构绝对加速度响应的降低作用,可以作为在这方面开展研究的思路。

在论证了高层建筑隔震原理和适用性的基础上,本文讨论了实现高层建筑隔震的技术要求,即隔震层的隔震垫方案为:数量少、大直径、且尽量布置的周边,为满足这种隔震技术的要求,发展大直径、高受压承载力的隔震垫成为实现高层建筑隔震的技术关键。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Farzad Naeim, James M Kelly. Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice [M]. John Wiley & Sons, Inc, 1999
- [ 2 ] Pan P, Zamfirescu D and Nakashima M, et al. Base Isolation design practice in Japan: Introduction to the post-Kobe approach [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(1): 147~171
- [ 3 ] 祝勤. 隔震建筑隔震器的施工[J]. 浙江建筑, 2000, 97: 24~25  
Zhu Qin. Construction of seismic isolation bearings in building structures[J]. Zhejiang Construction, 2000, 97: 24~25 (in Chinese)
- [ 4 ] 孟美莉,张德强. 我国建筑物隔震与减震研究的现状与展望[J]. 河北建筑科技学院学报, 2003, 20(1): 62~64  
Meng Mei-li, Zhang De-qiang. Studies on existing and prospect of shock absorption and shock partition of our country [J]. Journal of Heber Institute of Architectural Science and Technology, 2003, 20(1): 62~64 (in Chinese)
- [ 5 ] 刘文光, 闫维明, 霍达, 等. 塔型隔震结构多质点体系计算模型及振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 64~70  
Liu Wen-guang, Yan Wei-ming, Huo Da, et al. Computation Model and Shaking Table Test for Isolated MDOF Tower Structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 64~70 (in Chinese)
- [ 6 ] 谢彪. 隔震技术在高层建筑中的应用[J]. 山西建筑, 2004, 30(14): 42~43  
Xie Biao. The application of vibration isolation technique in high-rise building[J]. Shanxi Architecture, 2004, 30(14): 42~43 (in Chinese)

(下转第 51 页)

器功率,对测试设备所记录结果进行编程处理,并且记录了阻尼器的温度变化情况。

以凯越酒店的 TMD 系统为例,这个系统中要求阻尼器可以在不采取外部冷却措施的情况下消耗 2 个马力的功率,结果显示阻尼器在测试中表面温度连续平稳的增加,在阻尼器腔体范围内,温度变化均匀,阻尼器有效地将热量消散到周围环境中。

## 6 结语

由于金属波纹管密封概念的采用,使液体粘滞阻尼器的使用进入到一个新的阶段和领域。同时,在土木工程领域中扣除人为因素、生产技术水平等原因后,一直困扰广大设计者以及生产厂家的漏油问题,通过对金属密封阻尼器的原理以及应用上,可以找到一些本质性的原因。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Alan Klenbczyk, Brian Breukelman. Structural Control of High Rise Building Using a Tuned Mass With Integral Hermetically Sealed, Frictionless Hydraulic Dampers[OL]. <http://www.taylordevices.com/TechnicalLiterature.htm>
- [ 2 ] Taylor DP. The Application of Energy Dissipation Damping Devices to an Engineered Structure or Mechanism[OL]. <http://www.taylordevices.com/TechnicalLiterature.htm>
- [ 3 ] Taylor DP. Damper Retrofit of The London Millennium Footbridge ——a Case Study in Biodynamic Design[OL]. <http://www.taylordevices.com/TechnicalLiterature.htm>
- [ 4 ] Sample Technical Specifications for Hermetically Sealed, Frictionless Fluid Viscous Damping Devices[OL]. Taylor Devices
- [ 5 ] 陈永祁. 工程结构用液体粘滞阻尼器的结构构造和速度指数[J]. 钢结构, 2008(9)  
Chen Yong-qi. Construction and Velocity Exponents of Fluid Viscous Damper for Structural Engineering [J]. Steel Construction, 2008, 9(in Chinese)
- [ 6 ] 马良<sup>†</sup>, 陈永祁. 对液体粘滞阻尼器动力性能及测试要求的研究及探讨[J]. 建筑结构, 2008(6)  
Ma Liang-zhe, Chen Yong-qi. Research and Investigation on Dynamic Performance and Testing Requirements of Liquid Viscous Dampers [J]. Building Structure, 2008 (5) (in Chinese)
- [ 7 ] 金光辉, 张凌云. 隔震设计在高层建筑中的应用[J]. 建筑科学, 2004, 20(4): 19~21  
Jin Guang-hui, Zhang Lin-yun. Base isolation design for high-rise buildings[J]. Building Science, 2004, 20(4): 19~21 (in Chinese)
- [ 8 ] 刘文光. 橡胶隔震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, 2003
- [ 9 ] Masatsuki T, Midorikawa S, Ohori M, Miura H. Simulation for seismic behavior of office furniture in a high-rise building [J]. AII Journal of Structural Construction Engineering, n 620, 2007: 43~49

[作者简介] 马良<sup>†</sup> (1973~), 男, 汉族, 硕士, 研究方向为工程结构抗震及减震控制等  
[通信地址] 北京市海淀区增光路 27 号院增光佳苑 2-1-201 (100037)

## (上接第 63 页)

- [ 7 ] 金光辉, 张凌云. 隔震设计在高层建筑中的应用[J]. 建筑科学, 2004, 20(4): 19~21  
Jin Guang-hui, Zhang Lin-yun. Base isolation design for high-rise buildings[J]. Building Science, 2004, 20(4): 19~21 (in Chinese)
- [ 8 ] 刘文光. 橡胶隔震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, 2003
- [ 9 ] Liu Wen-guang. Mechanics properties of rubber bearings and earthquake response analysis of isolated structure[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003 (in Chinese)
- [ 9 ] Masatsuki T, Midorikawa S, Ohori M, Miura H. Simulation for seismic behavior of office furniture in a high-rise building [J]. AII Journal of Structural Construction Engineering, n 620, 2007: 43~49

[作者简介] 曲哲 (1983~), 男, 博士研究生, 陕西西安人。主要研究建筑结构抗震与减震, FRP 加固混凝土结构。E-mail: qz@mails.tsinghua.edu.cn