

粘弹性多维隔减震结构竖向振动台试验与研究

徐赵东^{①*}, 时本强^②, 巫可益^①, 曾晓^③

① 东南大学混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096;

② 顺德碧桂园物业发展有限公司, 顺德 528312;

③ 华信邮电咨询设计研究有限公司, 杭州 310014

* E-mail: xzdpod@sohu.com

收稿日期: 2008-07-04; 接受日期: 2008-11-25

国家自然科学基金(批准号: 50508010)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCEF-06-0472)、江苏省“333”高层次人才支持计划和江苏省自然科学基金(批准号: BK2008282)资助项目

摘要 粘弹性多维隔减震装置是一种新发明的被动控制装置, 同时具有多维隔震和减震性能。为掌握该装置在竖向地震作用下对结构的隔减震效果, 本文首先对加与未加装置的钢框架结构进行了竖向振动台对比试验, 然后对其动力特性、加速度反应和位移反应进行了比较分析, 最后将隔减震模型结构的有限元分析结果与试验结果进行了对比分析。试验和理论研究表明该装置在竖向对结构具有良好的隔减震作用。

关键词

隔减震
振动台试验
有限元
动力反应

1 引言

粘弹性材料是一种同时具有粘性流体和弹性固体特性的高分子聚合物, 具有良好的储存和耗散能量的能力。本文充分利用了粘弹性材料的高耗能特性开发了一种新型的多维隔减震装置, 对加入该装置的模型结构进行了竖向的振动台试验, 以掌握该隔减震结构竖向的动力特性和隔减震效果。

至今已有一些多维的隔震装置被研究应用于核电建筑和精密仪器的隔震中。1990 年, Tajirian 等人^[1]将弹性支座应用于三维的隔震中。1993 年, Tang 等人^[2]通过减小隔震装置的竖向刚度来解决建筑结构竖向隔震的问题。2002 年 Suhara 等人^[3]研制了装有板式橡胶支座的三维隔震装置。2002 年, Nakamura 等人^[4]提出了采用主导型橡胶支座的三维隔震装置。2002 年, Kashiwazaki 等人^[5]对装于液压机构的三维隔震系统进行了可行性试验测试。2002 年, Kajii 等人^[6]用于液

压缸的三维隔震系统。2005 年, Shimada 等人^[7]用于下一代具有旋转密封型空气弹簧和液压摆动悬浮系统核电站的三维隔震系统。基于以上研究, 一些学者通过采用碟形弹簧对竖向隔震进行了研究。2001 年, Somaki 等人^[8]提出了一个带有碟形弹簧的三维隔震系统。2004 年, 刘天适等人^[9]采用碟形弹簧对竖向减震系统进行了研究。2003 年, 瞿伟廉等人^[10]研究了基于带有智能隔震系统的多层建筑结构的竖向扭矩振动反应控制。2004 年, 熊世树等人^[11]分析了基于三维隔震结构的多维振动反应的非线性特性。2004 年, 熊世树等人^[12]分析了装有三维隔震装置结构的侧向张力和竖向振动反应。在这些研究中碟形弹簧被加到装置中以增大阻尼, 但阻尼仍然较小。而且当阻尼被增大时, 同时也将使得装置的结构复杂化。

本文提出的多维隔减震装置有 2 个显著的优点。一是, 该装置具有阻尼大且结构简单的特性。另一个

引用格式: 徐赵东, 时本强, 巫可益, 等. 粘弹性多维隔减震结构竖向振动台试验与研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(10): 1709—1715

Xu Z D, Shi B Q, Wu K Y, et al. Vertical shaking table tests on the structure with viscoelastic multi-dimensional earthquake isolation and mitigation devices. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(10): 2869—2876, doi: 10.1007/s11431-009-0092-6

是该装置能同时进行隔震和减震. 为了掌握该装置对结构竖向的隔震和减震特性, 首先, 对加与未加装置的结构进行了振动台试验比较; 然后, 对加与未加装置的结构进行了动态特性和动态反应分析; 最后, 对有限元分析结果和试验结果进行了比较分析. 结果表明, 该装置在竖向具有显著的隔震和减震效果.

2 振动台试验概况

2.1 装置的性能

粘弹性多维隔减震装置(发明专利授权号: ZL03113392.4, 徐赵东, 等)如图 1 所示, 图 1(a)为实物图, 图 1(b)为构造图, 其由粘弹性阻尼器、核心支座和预压弹簧组成.

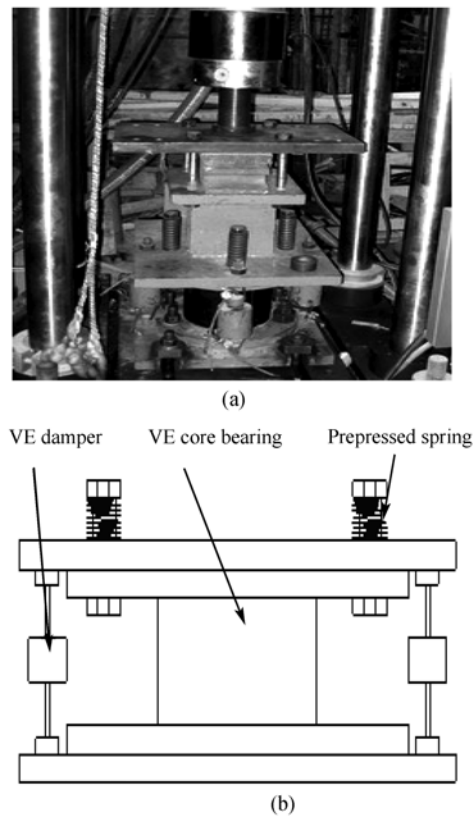


图 1 粘弹性多维隔减震装置
(a) 实物图; (b) 构造图

该装置的创新之一在于用粘弹性材料取代了橡胶材料, 材料自身具有较大的阻尼和良好的耗能能力, 材料的滞回曲线为饱满的椭圆, 图 2 为其性能试验结果, 这种耗能性能使得该种装置减震性能优于

普通的橡胶支座. 在水平地震作用影响下, 该装置能在水平方向上像叠层橡胶支座那样工作, 减小地震作用对上部结构的影响, 同时耗能核心垫和竖向阻尼器在水平向发生变形, 通过粘弹性材料的阻尼消耗输入结构的能量, 起到了隔震和减震的双重作用(关于水平向的振动台试验和分析由于篇幅限制将另文介绍^[13]). 该装置的另一个创新在于采用小阻尼器、隔震支座和弹簧联合组成竖向隔减震系统, 一方面在竖向形成刚度薄弱层, 起到隔震作用, 另一方面竖向减震系统在压紧压松的振动变形中耗散振动能量, 起到减震作用.

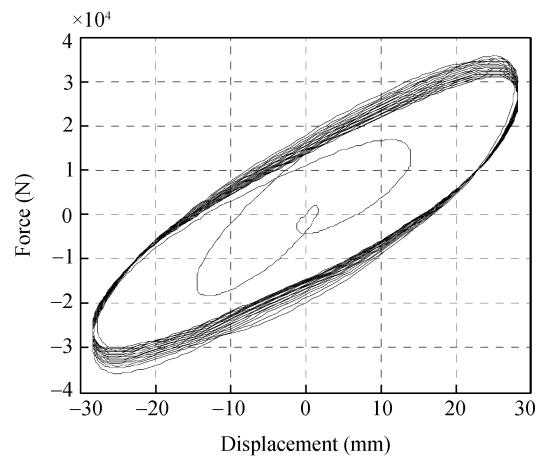


图 2 粘弹性材料的耗能曲线

2.2 模型结构设计与加载

本文对安装与不安装隔减震装置的钢框架缩尺模型进行了振动台试验. 原结构为一个两榀三层钢框架结构, 跨度为 $3.6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 高度为 10.5 m . 模型缩尺比为 $1:5$, 梁柱均采用工 10 钢, 模型结构的层高及总重如图 3 所示, 两榀独立的框架采用槽钢在各层相焊, 并在槽钢上安放质量块, 以模拟各楼层重量. 框架结构的柱脚与隔减震装置顶板相焊接, 同时支座底板与振动台台面通过连接钢板螺栓锚固, 图 4 为已安装好的振动台试验结构, 每个隔减震装置上都设有 6 个固定螺栓, 当松开螺栓时进行加入装置的振动台试验, 当固定螺栓时进行未加入装置的振动台试验. 试验中使用了 4 个加速度传感器, 分别布置在钢框架的台面、一层、二层和顶层, 竖向位移计布置于装置顶面和顶层.

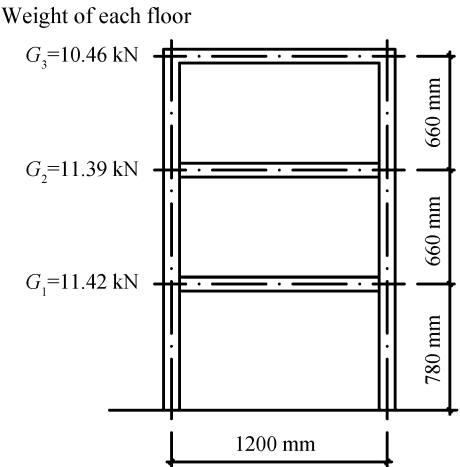


图 3 三层钢框架模型结构示意图



图 4 振动台试验模型

试验在河海大学振动台试验室进行, 采用从美国 MTS 公司引进的液压伺服式振动台设备进行加载. 试验中先进行白噪声扫描, 测试模型的自振频率、振型和阻尼比. 然后采用 El Centro 波与 Taft 波进行竖向单维输入, 峰值加速度分别为: 120, 240, 400, 600 和 800 gal. 加载后再次进行白噪声扫描测试结构的动力特性变化, 具体加载过程如表 1 所示.

表 1 振动台试验加载工况

编号	加载波	幅值 /gal	装置状态	编号	加载波	幅值 /gal	装置状态
1	白噪声	200	采用	8	Taft	240	未采用
2	Taft	120	采用	9	El-Centro	240	未采用
3	El-Centro	120	采用	10	El-Centro	400	未采用
4	Taft	240	采用	11	白噪声	200	采用
5	El-Centro	240	采用	12	白噪声	200	采用
6	Taft	120	未采用	13	El-Centro	400	采用
7	El-Centro	120	未采用	14	白噪声	200	采用

3 试验结果与分析

3.1 动力特性

为取得模型结构竖向的动力特性参数, 本试验共进行了 4 次白噪声扫描. 主要测试模型竖向的一阶自振频率、阻尼比和振型. 对扫描出的各层加速度反应时程曲线进行频谱分析, 幅频特性图上的峰值对应结构的自振频率, 由于建筑结构的阻尼通常较小, 且各阶固有频率分散, 故采用半带宽法确定结构的阻尼比. 试验中不加装置的结构竖向自振频率很高, 在幅频特性图的高频区难以辨识, 故只获得了加入装置的结构自振频率与阻尼比, 如表 2 所示. 竖向的一阶振型曲线如图 5 所示.

表 2 加入装置结构自振频率及阻尼比

扫描工况	第一自振频率/Hz	第一阻尼比
第一次(r_1)	23	0.0357
第二次(r_2)	24	0.0344
第三次(r_3)	23	0.0341
第四次(r_4)	23	0.0362

在整个试验过程中, 对使用装置的结构进行了 4 次白噪声扫描, 由表 2 可知, 4 次扫描的频率均为 23 或 24 Hz, 同时第一振型和该振型下阻尼比变化也不大, 这说明加入装置的结构在试验过程中刚度基本没有发生变化, 框架始终处于弹性阶段, 没有发生塑性变形, 同时隔减震装置没有发生破坏.

3.2 加速度反应

本文对加与未加隔减震装置的结构各工况下的竖向加速度进行了分析, 并取得了结构各层的最大加速度值以及结构各层加速度动力放大系数. 由于试验工况以及采集通道较多, 鉴于篇幅关系, 在此仅列出 400 gal El Centro 波激励下结构第一层和顶层相对于台面的加速度时程曲线, 如图 6 所示. 由图 6 对比的时程曲线可以看出, 加入装置结构的加速度反应小于未加入装置结构的加速度反应, 说明多维隔减震装置在竖向上对结构具有一定的隔减震效果. 未加装置时结构顶层最大加速度为 7.093 m/s^2 , 加入装置后结构顶层最大加速度为 6.577 m/s^2 , 减小了 7.85%. 对于本次振动台试验, 同未加装置的结构相比, 加入装置的结构加速度反应平均减小了 10.75%.

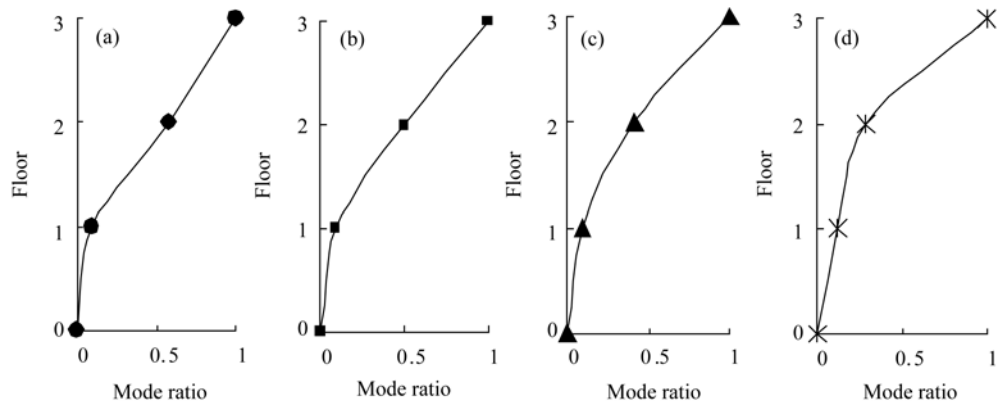


图 5 白噪声扫描竖向第一阶振型曲线

(a) 第一次扫描; (b) 第二次扫描; (c) 第三次扫描; (d) 第四次扫描

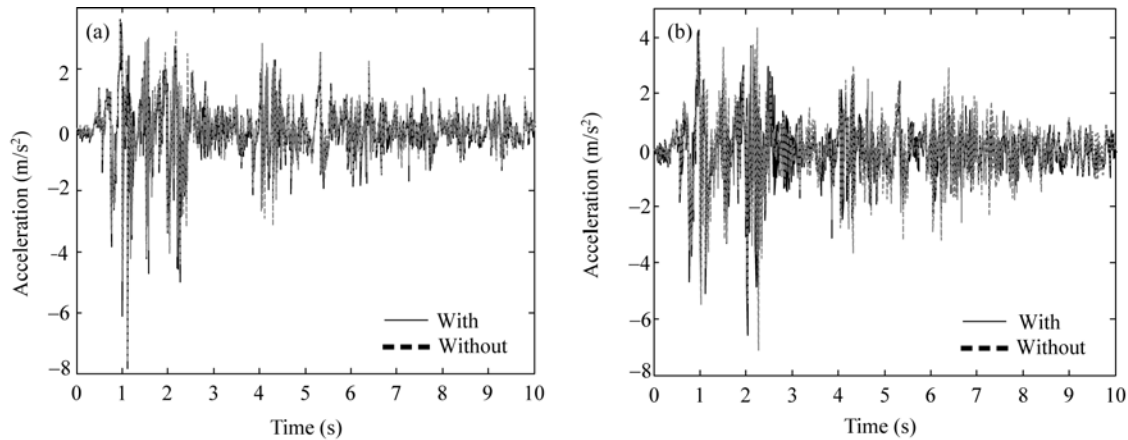


图 6 400 gal El Centro 波激励下加速度对比

(a) 第一层加速度对比; (b) 顶层加速度对比

由于加入装置与未加装置的结构是先后进行试验的, 2 种工况下台面的实测加速度激励略有差异, 因此从各层的动力反应对台面激励的动力放大系数进行分析更有意义.

图 7 为不同激励下各层加速度反应的动力放大系数, 从图 7 中可以看出, 加入装置后结构各层的动力放大系数均有明显的减小, 例如在 240 gal El Centro 波激励下, 顶层加速度放大系数从未使用装置时的 2.112 减小到使用支座时的 1.935, 减小了 8.38%, 第二层是从未使用装置时的 3.284 减小到使用装置时的 2.614, 减小了 20.40%, 第一层则减小了 29.04%. Taft 波激励下的模型结构在使用装置时, 各层的动力放大系数也均有相当大的衰减. 说明粘弹性多维隔减震装置能有效的减小上部结构的竖向地震反应, 起

到良好竖向隔减震的作用.

3.3 位移反应

试验采集了加与未加该装置的结构各工况下的竖向位移反应, 由于只在顶层及台面布置了竖向位移计, 而且底层的位移计经常变动, 故在此仅列出数据较为完整的 240 gal Taft 波和 400 gal El Centro 波激励下顶层的位移反应, 如图 8 所示.

位移采集在振动台试验中存在着一个共性问题, 即结构绝对位移的时程曲线均存在漂移现象. 从图 8 中可以看出, 加入装置后框架结构顶层位移变化并不明显, 产生这种现象的原因是: 在竖向地震作用下, 隔减震装置并没有脱开, 装置和结构本身所发生的竖向位移都非常小, 主要的位移是由于台面激励所致. 因此从竖向位移上难以判别隔减震装置的隔减震效果.

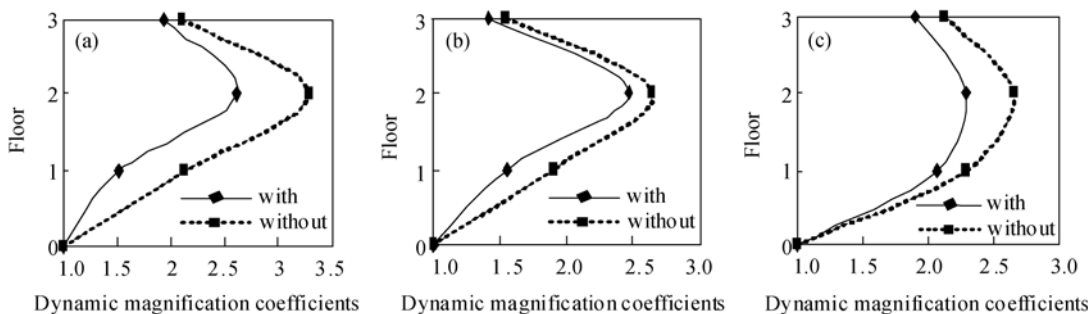


图 7 结构各层动力放大系数

(a) 240 gal El Centro 波激励; (b) 240 gal Taft 波激励; (c) 400 gal El Centro 波激励

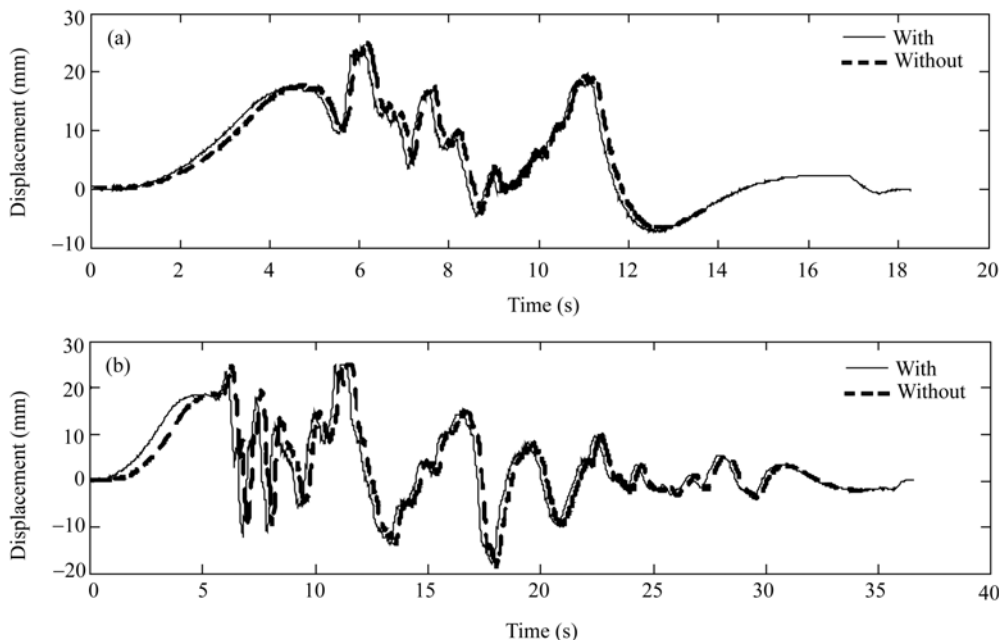


图 8 顶层绝对位移反应比较

(a) 240 gal Taft 波下顶层绝对位移比较; (b) 400 gal EL Centro 波下顶层绝对位移比

4 有限元分析比较

4.1 计算模型

振动台试验模型分 2 部分建立. 上部结构为平面钢框架, 三层总高度为 2100 mm, 开间为 1200 mm. 下部隔震层为粘弹性多维隔减震装置, 整个模型除隔减震装置外其余材料均为钢材. 分别建立加与未加隔减震装置结构的有限元模型. 在建模过程中阻尼单元采用 Kelvin 模型, 即将粘壶单元和弹簧单元并联使用, 再参照性能试验^[14]所得的参数设定粘壶单元和弹簧单元的有限元参数, 性能试验时核心支座上下钢板发生 1~8 mm 的相对位移, 基于大量位移幅值下的试验结果得出粘弹性材料的储能模量和损耗

因子, 进而求出粘壶单元的等效阻尼为 484 kN·s/m, 弹簧单元的等效刚度为 3.75×10^4 kN/m.

4.2 动力特性比较

通过有限元计算, 可以得到加与不加装置情况下模型结构的振型曲线与自振频率. 使用装置结构的有限元计算第一阶自振频率为 23.77 Hz, 试验平均值为 23.25 Hz, 两者是吻合的. 此外, 不加装置的结构竖向一阶自振频率在试验中没有测得, 不加装置的结构有限元计算竖向一阶自振频率为 84.32 Hz, 说明装置的加入大大减小了结构的竖向刚度. 图 9 为加入装置结构试验与有限元的一阶振型曲线比较. 通过比较发现, 振型曲线的形状是基本一致的, 只是在振型比值上存在一定的误差.

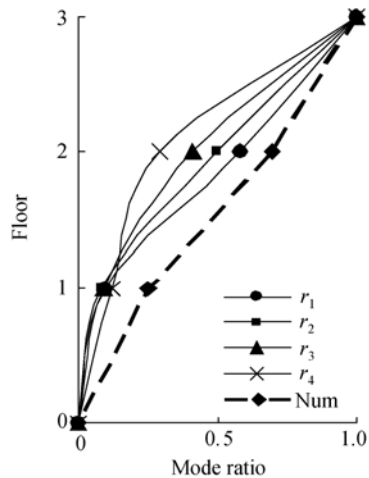


图9 受控结构试验与计算一阶振型比较

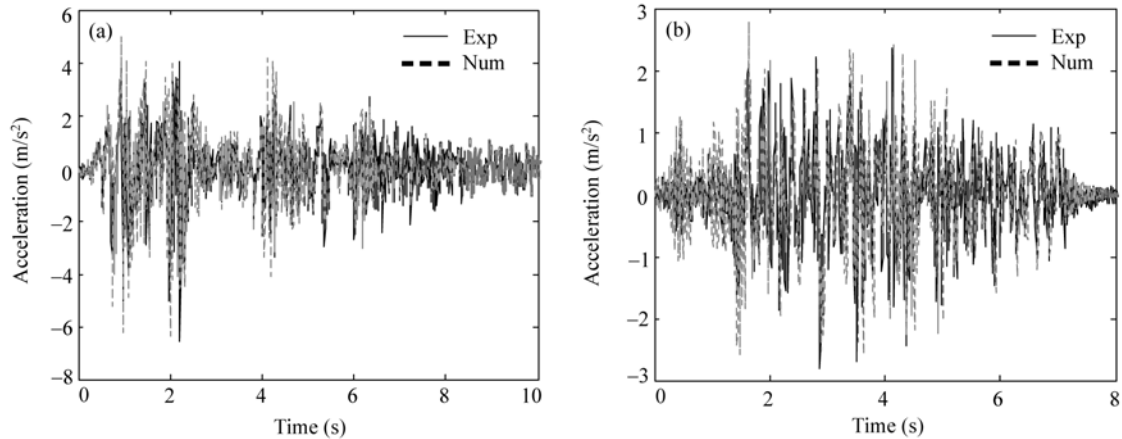


图10 加入装置结构顶层加速度试验与试算比较

表3 各工况下加速度最大值有限元计算与试验结果比较

激励工况	楼层	使用装置(m/s ²)			未使用装置(m/s ²)			
		计算	试验	计算/试验	计算	试验	计算/试验	
El Centro	120 gal	3	2.050	2.145	0.956	2.833	2.776	1.021
		2	2.440	2.779	0.878	3.456	3.106	1.113
		1	1.760	1.987	0.886	1.784	1.674	1.066
	240 gal	3	3.620	3.891	0.930	4.253	3.963	1.073
		2	4.870	5.256	0.927	5.884	6.161	0.955
		1	3.040	3.046	0.998	3.684	4.005	0.920
	400 gal	3	6.341	6.577	0.964	7.494	7.093	1.057
		2	7.437	7.903	0.941	8.568	8.854	0.968
		1	6.841	7.151	0.957	7.956	7.640	1.041
Taft	120 gal	3	1.299	1.409	0.922	1.656	1.491	1.111
		2	1.735	1.966	0.883	2.234	2.455	0.910
		1	1.663	1.802	0.923	1.768	1.979	0.893
	240 gal	3	2.773	2.808	0.988	3.253	2.999	1.085
		2	4.526	4.873	0.929	4.778	5.143	0.929
		1	2.831	3.062	0.925	3.269	3.714	0.880

顶层最大加速度反应的试验值为 2.808 m/s^2 , 有限元计算结果为 2.773 m/s^2 , 比值为 0.988, 两者误差为 1.2%。无论是对于 El Centro 波, 还是对于 Taft 波, 在 120 gal 地震激励下, 计算结果和试验结果误差比 240 和 400 gal 地震激励下的误差要大, 最大误差发生在 120 gal El Centro 波作用下加入装置结构的第二层, 为 12.2%。由此可见, 建立的有限元模型是较为精确的, 参数设定及相关假定也是较为合理的, 结构加入隔减震装置后可以有效减小其竖向加速度反应。

4.4 位移反应比较

试验中结构的位移反应如前所述存在漂移现象, 并且主要反应台面激励位移。楼层和隔减震装置本身的竖向位移较小, 如通过试验测出, 现有的位移计达不到精度要求, 因此本文并没有将位移反应的有限元计算结果和试验进行比较。经对加与不加隔减震装置的模型结构进行有限元分析, 在 240 gal El Centro 波激励下, 加入隔减震装置结构顶层相对于台面的竖向位移为 $7.77 \times 10^{-2} \text{ mm}$, 未加隔减震装置结构顶层相对于台面的竖向位移为 $8.62 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。在 240 gal Taft 波激励下, 加入隔减震装置结构顶层相对于台面的竖向位移为 $6.75 \times 10^{-2} \text{ mm}$, 未加隔减震装置结构顶层相对于台面的竖向位移为 $8.38 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 。可以看出, 楼层相对于台面的竖向位移很小, 超出了

位移测试的精度范围。此外, 加入装置后, 从有限元计算的位移结果来看, 楼层相对位移增大了, 这表明: 隔减震装置的加入减小了结构的竖向刚度, 使得结构竖向的位移放大了, 尽管如此, 可以发现这点放大的位移反应是非常小的。从位移的计算结果进一步说明因隔减震装置处位移较小, 装置耗散的振动能量也受到限制, 因此在竖向上装置主要是起隔震作用, 在普通或较小的地震作用下减震作用是有限的。

5 结论

本文对加入粘弹性多维隔减震装置的结构进行了竖向的振动台试验, 并对振动台试验模型进行了有限元分析, 得到如下结论。

- 1) 结构加入粘弹性多维隔减震装置后, 其竖向自振频率明显减小, 地震作用下结构竖向加速度反应平均减小了 10.75%, 而竖向位移反应则变化不大。
- 2) 有限元分析时隔减震装置阻尼单元采用了 Kelvin 模型, 经分析比较可知有限元模型的动力特性、加速度反应与试验结果较吻合, 说明所建立的有限元模型是准确的, 参数选择和模型假设是合理的。
- 3) 理论分析和试验结果表明多维隔减震装置在竖向上对结构具有一定的隔震效果, 隔减震装置主要是起隔震作用, 在普通或较小的地震作用下减震作用是有限的。

参考文献

- 1 Tajirian F F, Kelly J M, Aiken I D, et al. Elastomeric bearings for three-dimensional seismic isolation. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, Seis, Shock, Vib Isol, 1990, 200: 7—13
- 2 唐家祥, 刘再华. 建筑结构基础隔震. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993
- 3 Suhara J, Okada Y, Tamura T, et al. Development of three dimensional seismic isolation device with laminated rubber bearing and rolling seal type air spring. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, 2002, 445(2): 43—48
- 4 Nakamura K, Ogiso S, Suzuki M, et al. Development of double metal bellows air pressure spring with lead rubber bearing type 3-dimensional seismic isolator. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, 2002, 445(2): 27—34
- 5 Kashiwazaki A, Fujiwaka T, Shimada T, et al. Feasibility tests on a three-dimensional base isolation system incorporating hydraulic mechanism. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, 2002, 445(2): 11—18
- 6 Kajii S, Kunitake N, Sawa N, et al. Three dimensional seismic isolation system using hydraulic cylinder. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, 2002, 445(2): 35—42
- 7 Shimada T, Suhara J, Inoue K, et al. Three dimensional seismic isolation system for next-generation nuclear power plant with rolling seal type air spring and hydraulic rocking suppression system. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, Seis Eng, 2005, 8: 183—190[doi]
- 8 Somaki T, Miyamoto A, Oyobe Y, et al. Development of 3-dimensional base isolation system with coned disk spring. ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, Seis Eng, 2001, 428(2): 49—55
- 9 刘天适, 赵强, 王国兴. 碟形弹簧竖向减震体系的分析与研究. 世界地震工程, 2004, 20(2): 1—5
- 10 瞿伟廉, 周强, 苏经宇. 多层建筑结构水平剪扭-竖向地震反应的智能复合隔震控制. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 187—189
- 11 熊世树, 陈金凤, 梁波. 三维基础隔震结构多维地震反应的非线性分析. 华中科技大学学报, 2004, 32(12): 81—84
- 12 熊世树, 唐建设, 唐家祥, 等. 装有 3DB 的三维隔震建筑的平扭-竖向地震反应分析. 工程抗震与加固改造, 2004, 5: 17—22
- 13 徐赵东, 曾晓, 巫可益, 等. 多维隔减震结构水平向振动台试验及隔减震性能分析. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(7): 1715—1722
- 14 时本强. 多维减震支座及其结构竖向试验研究. 硕士学位论文. 南京: 东南大学, 2007