



多维隔减震结构水平向振动台试验及隔减震性能分析

徐赵东^{①*}, 曾晓^②, 巫可益^①, 李爱群^①, 徐庆阳^①

① 东南大学土木工程学院, 南京 210096;

② 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: 2008-05-23; 接受日期: 2008-11-20

国家自然科学基金项目(批准号: 50508010)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-06-0472)、江苏省自然科学基金(批准号: BK2008282)、江苏省 333 高层次人才培养计划资助

摘要 多维粘弹性隔减震装置是一种新发明的被动控制装置, 具有隔震和减震性能. 为掌握该装置在水平地震作用下对结构的隔减震效果, 本文对加与未加装置的钢框架结构进行了水平向振动台对比试验, 并对其隔减震性能进行了研究. 试验和理论研究结果表明: 该装置在水平方向上对结构具有隔震和减震的双重效果, 是一种有效的隔减震装置; 这种新型隔减震结构的水平向减震系数可以参照隔震结构的水平向减震系数的计算方法计算.

关键词

隔减震

振动台试验

动力反应

常用的隔震支座有橡胶隔震支座、滑动摩擦隔震支座、摩擦滚摆隔震支座等. 然而这些装置仅是靠隔离地震能量向上部结构传输, 装置本身耗能能力较小, 有时甚至将放大结构的动力位移响应. 目前对于既隔震又减震的装置的研究较为少见, 薛素铎等人^[1]设计了一种形状记忆合金-橡胶支座, 该支座克服了普通橡胶支座阻尼小的问题, 改善了橡胶支座的隔减震性能; 瞿伟廉等人^[2]提出了碟形弹簧-橡胶隔震垫和磁流变阻尼器组成的智能复合隔减震系统. 而事实上对于隔减震结构的振动台或拟动力试验研究则更为少见, 显然, 对隔减震装置及其结构的相关试验与研究具有重要的意义.

粘弹性材料是一种同时具有粘滞流体和弹性固体特性的高分子聚合物材料, 具有良好的耗能能力. 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振动台试验和理论分析, 试验和理论分析结果验证了所发明装置的隔减震性能.

1 振动台试验概况

1.1 多维隔减震装置的机理与特性

所研究的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, 其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

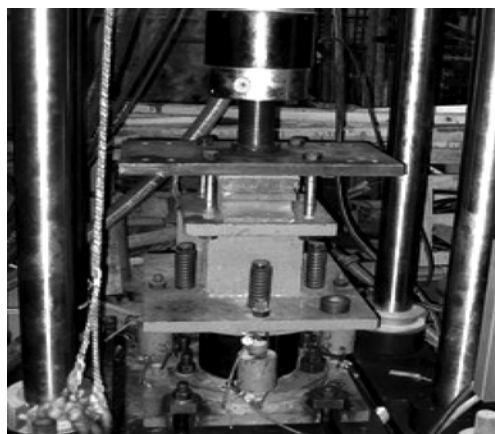


图 1 粘弹性多维隔减震装置

较大的阻尼和良好的耗能能力, 其滞回曲线表现为饱满的椭圆, 从而使得该装置减震性能优于普通的橡胶支座. 该装置的另一创新在于用小阻尼器、隔震支座和弹簧联合组成竖向隔减震系统, 有效地减小结构竖向的地震作用. 由于篇幅限制, 关于竖向的振动台试验和分析将另文介绍. 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, 通过阻尼消耗输入结构的能量, 起到了隔震和减震的双重作用.

对多维隔减震装置在不同频率和幅值下进行性能试验, 在水平简谐荷载作用下装置的力-位移滞回曲线如图 2 所示, 其为一饱满的椭圆, 这表明所发明的装置具有较好的耗能能力.

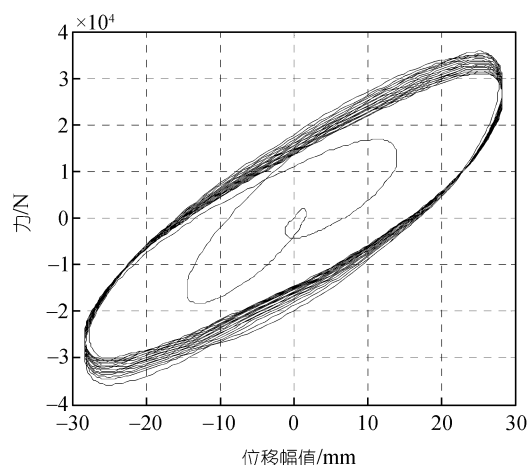


图 2 隔减震装置水平向耗能曲线

1.2 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. 原结构是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. 框架结构的柱脚与隔减震支座顶板相焊接, 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, 每个支座上都设有 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

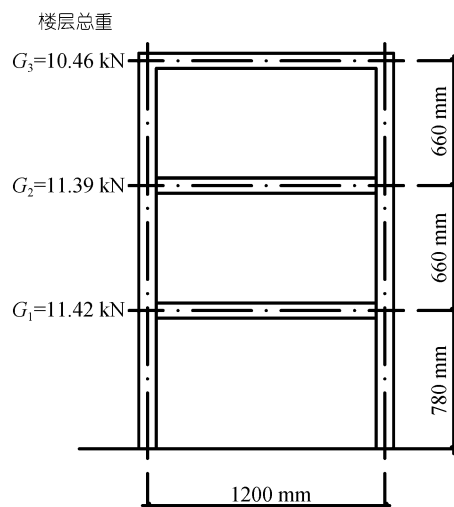


图 3 三层钢框架模型结构示意图



图 4 振动台试验模型

面、一层、二层和顶层, 水平向位移计布置于各层.

试验在河海大学振动台试验室进行. 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 波进行加载, 峰值加速度分别为: 120, 240, 400, 600, 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.

2 试验结果与分析

2.1 动力特性

为取得模型结构在使用与未使用装置状态下的动力特性, 本试验共进行了四次白噪声扫描. 主要测试模型水平向各阶自振频率、阻尼比、振型. 对扫描

表 1 振动台试验加载工况

编号	工况名	加载波	幅值/gal	装置状态	编号	工况名	加载波	幅值/gal	装置状态
1	R1	白噪声	200	未采用	9	T2	Taft	240	采用
2	LT1	Taft	120	未采用	10	LE5	El Centro	400	未采用
3	LE1	El Centro	120	未采用	11	R2	白噪声	200	未采用
4	E1	El Centro	120	采用	12	R3	白噪声	200	采用
5	T1	Taft	120	采用	13	E5	El Centro	400	采用
6	LT2	Taft	240	未采用	14	E7	El Centro	600	采用
7	LE2	El Centro	240	未采用	15	E8	El Centro	800	采用
8	E2	El Centro	240	采用	16	R4	白噪声	200	采用

出的各层加速度反应时程曲线进行频谱分析, 利用加速度传递函数以及快速傅立叶变换作出加速度的幅频和相频特性图. 幅频特性图上的峰值对应结构的自振频率, 采用半带宽法^[3]确定结构的阻尼比. 在每种工况下, 由结构一、二、三层的加速度反应所得到的自振频率和阻尼比取平均值, 从而得到每种工况下的自振频率和阻尼比. 试验所得的频率与阻尼比如表 2 所示.

从表 2 的数据可知, 模型结构加入多维隔减震装置后, 模型结构的第一自振频率有大幅度的下降, 如第一自振频率在第三次白噪声扫描下为 4.73 Hz, 而在第一次白噪声扫描下为 7.38 Hz, 减小了 2.65 Hz, 减幅达 35.94%, 表明多维隔减震装置的加入延长了结构的水平向自振周期, 在水平方向对结构起到了明显的隔震作用; 同时也可以看出: 加入多维隔减震装置后的模型结构, 阻尼比提高非常大, 如第一阶自

振频率下的阻尼比从原来的 4.69% 增大到 14.80%, 提高了 215.56%, 说明多维隔减震装置的加入在水平方向上有相当明显的减震作用. 对第三及第四次白噪声扫描结果进行分析可以得到同样的结论. 在对试验结果进行频谱分析时, 第二和第三阶自振频率附近的频谱有较多次峰现象, 较难得到结构在此频率下的阻尼比, 因此表 2 中的第二、第三阶阻尼比没有列出.

2.2 加速度反应

为了更好的验证多维隔减震装置的隔减震性能, 对加与未加该装置的结构各工况下的水平加速度反应进行了对比分析. 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 波激励下结构第二层和顶层相对于台面的加速度时程曲线, 如图 5 所示. 由图 5 时程曲线对比可以看出,

表 2 结构动力特性分析结果

工况号	动力特性	第一阶	第二阶	第三阶	工况号	动力特性	第一阶	第二阶	第三阶
R1	频率	7.38	27.13	49.16	R3	频率	4.73	22.34	48.67
未用装置	阻尼比	4.69%	—	—	已用装置	阻尼比	14.80%	—	—
R2	频率	7.19	26.60	48.84	R4	频率	4.29	22.05	45.91
未用装置	阻尼比	4.19%	—	—	已用装置	阻尼比	13.86%	—	—

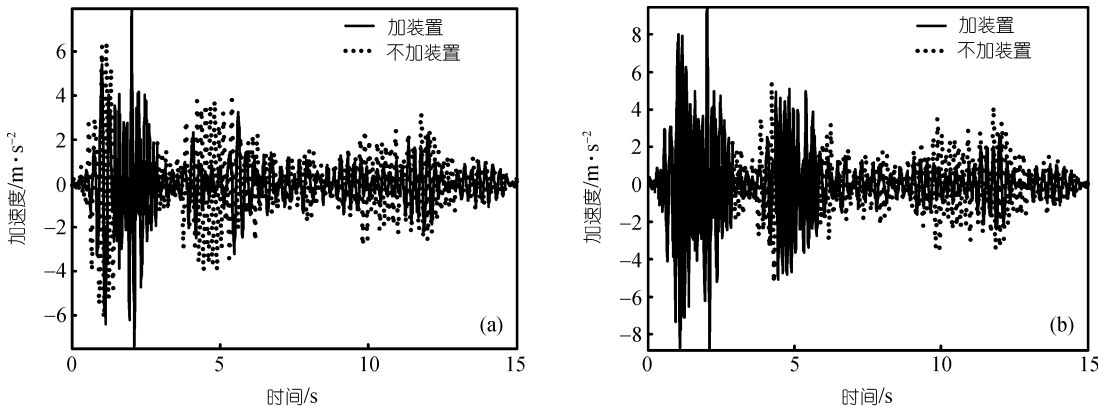


图 5 400 gal El Centro 波激励下加速度反应比较
(a) 第二层加速度反应; (b) 顶层加速度反应

加入隔减震装置结构的加速度反应明显小于未加入隔减震装置结构的加速度反应,说明多维隔减震装置在水平方向上对结构有着良好的隔减震效果.未加装置时结构顶层最大加速度反应为 8.877 m/s^2 ,加入装置后结构顶层最大加速度为 7.084 m/s^2 ,减小了 20.20%.这表明所研究的多维隔减震装置对结构具有良好的隔减震效应.

2.3 位移反应

同样对各工况下采集到的结构位移反应试验数据进行分析,图 6 为 400 gal El Centro 波激励下加与未加装置结构第一层和顶层相对于台面的位移时程曲线对比图.由图 6 可知:使用装置的模型结构在地震波激励下,结构各层的位移反应均有明显下降,加入装置结构的时程曲线较未使用装置的情况平缓得多.如未使用装置的结构顶层最大位移为 3.20 mm,而使用装置的结构顶层位移为 2.20 mm,减小了 31.25%.

对于隔震结构,较大的位移发生在隔震层,可以进一步分析结构各层相对于隔震装置顶板的位移,

通过计算各工况的试验数据可以得到各楼层相对于装置顶面的最大位移值,如表 3.由于在 600 gal 和 800 gal El Centro 波激励时,位移传感器出现了问题,所以表 3 中没有包括 600 gal 和 800 gal El Centro 波激励下结构的位移情况.从表 3 中可以看出当结构加入装置后,在不同工况下各层的位移反应得到了明显的减小.以 240 gal El Centro 波激励下的结构为例,未使用装置结构第一层、第二层和顶层的位移反应峰值分别为 1.11 mm, 1.78 mm 和 2.21 mm,使用装置后的结构第一层、第二层和顶层位移反应峰值分别为 0.68 mm, 1.20 mm 和 1.43 mm,分别减小了 38.74%、32.58%和 35.29%,经过计算,各工况下使用装置时结构各层位移反应平均减小了 36.41%.在 240 gal Taft 波地震激励下,结构使用装置后的第一、二、三层位移反应峰值分别减小了 52.59%, 47.09%和 50.68%.这进一步表明:所研究的多维隔减震装置在水平方向具有较好的隔减震效果, Taft 波下的隔减震效果要优于 El Centro 下的情况.

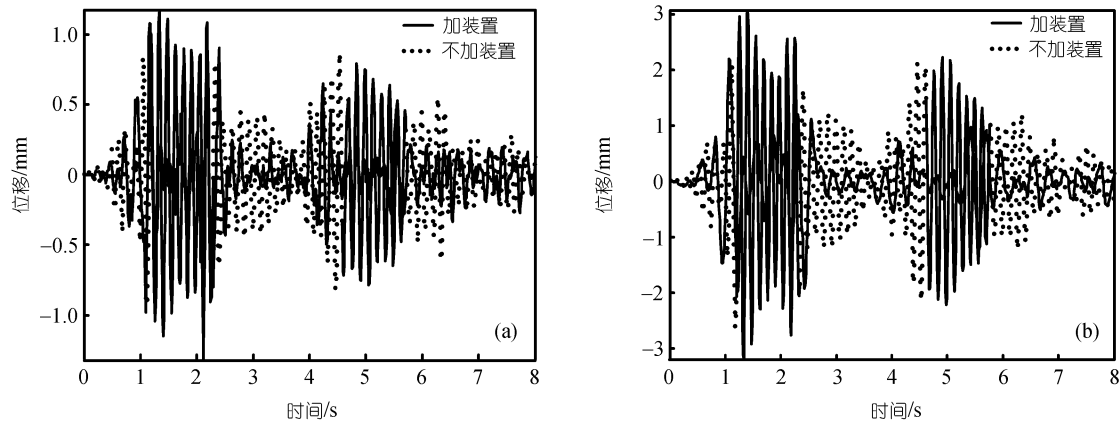


图 6 400 gal El-Centro 波激励下位移反应比较
(a) 第一层位移反应; (b) 顶层位移反应

表 3 各工况下楼层相对支座顶面的最大位移值

楼层	地震波	相对于支座顶面最大位移值/mm					
		120 gal		240 gal		400 gal	
		未使用	使用	未使用	使用	未使用	使用
一层	El Centro	0.47	0.34	1.11	0.68	1.31	1.08
	Taft	0.46	0.21	1.16	0.55	—	—
二层	El Centro	1.01	0.71	1.78	1.20	2.48	1.85
	Taft	0.81	0.59	2.06	1.09	—	—
三层	El Centro	1.39	0.80	2.21	1.43	3.20	2.20
	Taft	0.96	0.67	2.54	1.21	—	—

3 理论分析

3.1 参数确定

根据振动台试验的实际情况确定性能分析中需要用到的模型结构参数和粘弹性隔减震装置的参数. 单榀试验模型结构各层质量和层间刚度如表 4 所示.

表 4 模型结构各层质量和层间刚度

参数	第一层	第二层	第三层
质量/kg	583	581	534
刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	5.825×10^6	3.993×10^6	3.993×10^6

对于隔减震装置参数可以由下式计算装置的等效刚度与等效阻尼.

$$K_e = \frac{G_1 \cdot A_v}{nn \cdot h_v}, \quad (1)$$

$$C_e = \frac{\eta \cdot G_1 \cdot A_v}{nn \cdot \omega \cdot h_v}, \quad (2)$$

式中, G_1 为储能模量, η 为损耗因子, A_v , h_v 和 nn 分别为粘弹性层的剪切面积、厚度和层数. 振动台试验中使用的隔减震支座几何参数为 $A_v = 7771.5 \text{ mm}^2$, $h_v = 1 \text{ mm}$, $nn=25$. 因此关键在于确定储能模量 G_1 与激励频率 ω . 根据性能试验^[4]的具体情况并结合抗震规范^[5]关于隔震支座等效刚度和等效阻尼的相关规定(抗震规范 12.2.4 条第三款): 罕遇地震下, 直径小于 600 mm 的隔震支座宜采用水平加载频率为 0.1 Hz 且隔震支座剪切变形不小于 250% 的水平等效刚度和等效阻尼, 故取隔减震装置性能试验中频率为 0.1 Hz、剪切变形为 62.5 mm 下隔减震装置的储能模量 G_1 、等效刚度 K_e 、等效阻尼 C_e , 根据性能试验结果^[4], 取 $G_1=1.76 \text{ Mpa}$; 由白噪声扫描试验得到的使用装置时模型结构一阶自振频率为 4.508 Hz, 取 $\omega = 2\pi \times 4.508 = 28.324 \text{ rad/s}$. 由(1)式和(2)式可以得到装置的等效刚度和等效阻尼为

$$K_e = \frac{1.76 \times 10^6 \times 7771.5 \times 10^6}{25 \times 1 \times 10^3} = 547.11 \text{ kN/m},$$

$$C_e = \frac{0.36 \times 1.76 \times 10^6 \times 7771.5 \times 10^6}{25 \times 1 \times 10^{-3} \times 28.324} = 6.96 \text{ kN} \cdot \text{s/m}.$$

隔减震装置的等效阻尼比为

$$\zeta_d = \frac{C_e}{2m\omega} = \frac{2 \times 6.96 \times 10^3}{2 \times (1698/2) \times 28.324} = 0.145. \quad (3)$$

3.2 隔减震性能理论分析

隔震结构可以按照隔震或减震结构的减震系数^[6]概念来分析其隔减震效果. 在实际隔震或减震结构的设计中常用层间剪力的减震系数来评估结构的隔减震性能.

$$\psi_i = \frac{V_{ci}}{V_i}, \quad (4)$$

式中, ψ_i 为第 i 层的层间剪力减震系数, V_{ci} 和 V_i 分别为加与未加隔减震装置结构第 i 层的层间剪力.

本文采用等效侧力法^[7]计算结构的层间剪力. 由于隔震层的水平有效刚度远小于结构层间水平刚度, 水平地震作用下隔震结构的水平变形集中于隔震层, 第一振型的作用特别明显, 因此作为简化计算方法, 采用等效侧力法满足要求.

采用等效侧力法计算时, 结构总水平地震作用标准值按照下式计算.

$$F_{Ek} = \alpha_1 G, \quad (5)$$

式中, F_{Ek} 为结构总水平地震作用标准值, α_1 为相应于隔震房屋基本自振周期的水平地震影响系数, G 为上部结构总重力荷载代表值.

隔震层的水平有效刚度和有效阻尼比可以按下式进行计算.

$$K = \sum_{i=1}^n K_i, \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \zeta_{di}}{K}, \quad (7)$$

式中, K 为隔震层水平有效刚度, 为隔震层所有隔震支座、阻尼装置的等效刚度之和, K_i , ζ_{di} 为单个隔震减震装置的等效刚度和等效阻尼比; ζ 为隔震层的有效阻尼比, 可以近似看作隔减震结构的阻尼比. 得到有效阻尼比 ζ 后, 再求出隔震结构各质点所受的水平地震作用, 进而求出各层的层间剪力^[7].

以 400 gal 的 El Centro 波对结构的激励为例, 计算加与未加隔减震装置结构的层间剪力, 根据规范^[5]有 $\alpha_{\max}=0.90$. 对于未加入隔减震装置结构的阻尼比取两次试验阻尼比(如表 2)的平均值 4.4%. 根据表 4 结构的质量和刚度参数可计算出结构的第一自振频率为 7.39 Hz, 第一自振周期为 $T=0.14 \text{ s}$. 则有 $\alpha_1=$

$\eta_2\alpha_{\max}=1.041\times0.90=0.937$. 与阻尼比相关的系数 η_2 可由下式确定.

$$\eta_2=1+\frac{0.05-\zeta}{0.06+1.7\zeta}=1+\frac{0.05-0.044}{0.06+1.7\times0.044}=1.041. \quad (8)$$

结构的总水平地震作用标准值为 $F_{Ek}=\alpha_1G=15.55$ kN, 进而求出各层层间剪力为 $V_1=15.55$ kN, $V_2=9.60$ kN, $V_3=4.61$ kN. 对于加入隔减震装置的结构, 阻尼比取两次试验结果的平均值 14.3%, 可计算系数 η_2 为

$$\eta_2=1+\frac{0.05-\zeta}{0.06+1.7\zeta}=1+\frac{0.05-0.145}{0.06+1.7\times0.145}=0.693. \quad (9)$$

水平向地震作用影响系数 $\alpha_1=\eta_2\alpha_{\max}=0.693\times0.90=0.624$, 故结构的总水平地震作用标准值为 $F_{Ek}=\alpha_1G=10.36$ kN, 进而求出各层层间剪力为 $V_1=10.36$ kN, $V_2=6.38$ kN, $V_3=3.06$ kN.

由(4)式可以计算加入隔减震装置后底层的层间剪力减震系数

$$\psi_1=\frac{10.36}{15.55}=0.666. \quad (10)$$

3.3 隔减震性能试验分析

由抗震知识[5]可知: 水平向地震作用影响系数

$$\alpha=k\beta, \quad (11)$$

式中, k 为地震系数, $k=\frac{|\ddot{x}_g(t)_{\max}|}{g}$, $\ddot{x}_g(t)_{\max}$ 为地面运动加速度最大值, g 为重力加速度, β 为动力放大系数. 对于加与未加隔减震装置的结构, 重力荷载代表值

基本上没有发生变化, 从(5)式可以看出, 层间剪力的具体变化体现在水平向地震作用影响系数 α 的变化上. 试验时, 在具体的地震波时程激励中, 所关注的最大层间地震剪力与水平向地震作用影响系数最大值直接相关, 因此试验的减震系数 ψ_{Ei} 可以表达为

$$\psi_{Ei}=\frac{(\alpha_{Eci})_{\max}}{(\alpha_{Ei})_{\max}}, \quad (12)$$

式中, $(\alpha_{Eci})_{\max}$ 和 $(\alpha_{Ei})_{\max}$ 分别为加与未加隔减震装置结构第 i 层在试验地震激励过程中水平向地震作用影响系数最大值. 加与未加隔减震装置结构在试验地震激励过程中第 i 层的加速度反应动力放大系数最大值 $(\beta_{ci})_{\max}$ 和 $(\beta_i)_{\max}$ 首先被求解出来, 然后根据(11)式确定加与未加隔减震装置结构水平向地震作用影响系数最大值 $(\alpha_{Eci})_{\max}$ 和 $(\alpha_{Ei})_{\max}$. 这些求出的参数均列于表 5 中.

为便于直观地分析比较, 将部分水平向减震系数的理论值与试验值绘于图 7 中. 从图 7 和表 5 可以看出, 在不同地震激励下计算的减震系数和试验的减震系数吻合较好. 如在 120 gal El Centro 地震激励下, 加入装置结构第一、二、三层的水平向试验减震系数为 0.789, 0.713 和 0.659, 而相对应的计算结果为 0.666, 0.665 和 0.664, 误差分别为 15.59%, 6.73% 和 0.75%. 对于加入多维隔减震装置的结构, 其减震特性类似于橡胶支座隔震结构, 其水平向减震系数可以通过普通橡胶支座隔震结构减震系数的计算方法得到.

表 5 水平向减震系数的试验值

激励	层数	$(\beta_i)_{\max}$	$(\alpha_{Ei})_{\max}$	$(\beta_{ci})_{\max}$	$(\alpha_{Eci})_{\max}$	ψ_{Ei}
El Centro 120 gal	1	1.847	0.204	1.453	0.161	0.789
	2	2.206	0.244	1.577	0.174	0.713
	3	2.865	0.317	1.892	0.209	0.659
Taft 120 gal	1	1.601	0.184	1.252	0.130	0.706
	2	2.061	0.237	1.501	0.157	0.662
	3	2.646	0.304	1.748	0.183	0.600
El Centro 240 gal	1	1.662	0.368	1.625	0.323	0.877
	2	2.363	0.523	1.840	0.365	0.699
	3	3.114	0.688	2.096	0.416	0.605
Taft 240 gal	1	2.086	0.232	1.167	0.208	0.896
	2	4.615	0.515	1.706	0.305	0.592
	3	5.183	0.575	1.903	0.340	0.591
El Centro 400 gal	1	1.827	0.629	1.308	0.514	0.817
	2	2.430	0.835	1.612	0.633	0.758
	3	2.635	0.905	1.841	0.722	0.798

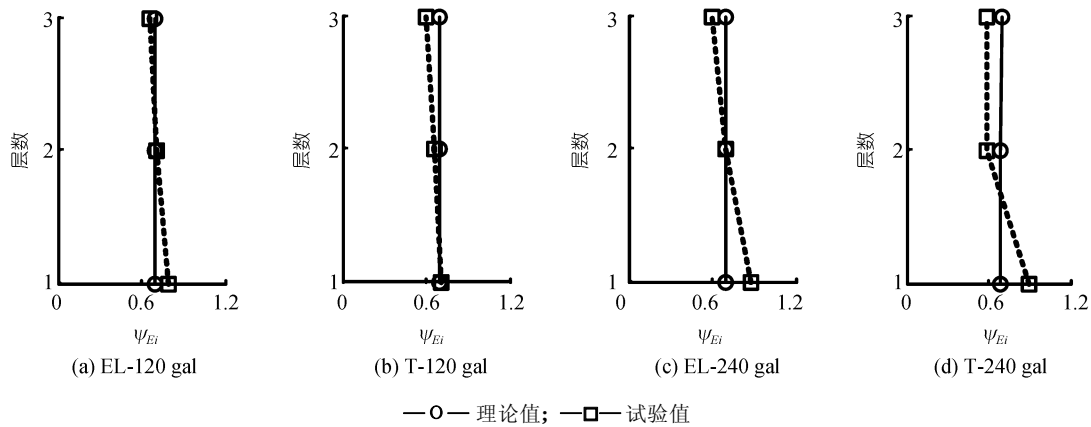


图7 水平向减震系数理论值和试验值比较

4 结论

本文对加入粘弹性多维隔减震装置的结构进行了水平向振动台试验, 并对其隔减震性能进行了分析研究, 通过试验和理论分析得出如下结论.

1) 结构加入粘弹性多维隔减震装置后, 其自振频率明显减小, 周期延长, 阻尼比明显增大. 地震作用下结构位移反应平均减小35.57%, 加速度反应平均减小21.68%. 试验研究结果表明: 该装置在水平

方向上对结构具有隔震和减震的双重效果, 是一种有效的隔减震装置.

2) 对于加入多维隔减震装置的结构, 其地震影响系数可以参照中国抗震规范的相关计算方法. 通过试验和计算结果可以看出加入多维隔减震装置的结构减震特性类似于橡胶支座隔震结构, 其水平向减震系数可以通过普通橡胶支座隔震结构减震系数的计算方法得到.

参考文献

- 1 薛素铎, 周乾. SMA-橡胶复合装置的设计与隔震性能. 世界地震工程, 2003, 19(4): 34—38
- 2 瞿伟廉, 周强等. 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—195
- 3 Clough R, Penzien J. Dynamics of Structures. Berkeley: Computers and Structures Inc, 2003
- 4 Xu Z D. Report of experimental study on the multi-dimensional earthquake isolation and mitigation devices (in Chinese). Nanjing: Southeast University, 2006
- 5 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范 GB50011-2001, 2001
- 6 唐家祥. 建筑隔震与消能减震设计. 建筑科学, 2002, 18(1): 21—44
- 7 Chopra A K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (2nd Edition). London: Prentice Hall, 2000