

中间隔震层位置变化对混合被动控制体系控制效果影响的试验研究

吴巧云^{1,2,3}, 刘梓良¹, 闫慧超¹, 何宛澄¹, 朱宏平⁴

(1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073; 2. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100022; 4. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一种分段隔震结构与相邻结构连接耗能的新型混合被动控制体系。与单一的减隔震体系相比, 这种新体系将隔震与阻尼器耗能结合在一起, 对不同频域地震动具有较强的鲁棒性。通过振动台试验输入不同频域的地震动, 研究了分段隔震结构中间隔震层位置变化对隔震效果的影响。最后将有限元数值模拟与试验结果进行了对比。研究表明: 长周期地震波对隔震结构的位移、加速度的影响相较于其他频域地震动更为显著, 会使隔震支座超限的可能性增大; 中间隔震层位于结构竖向靠中部位置时结构整体动力响应最小; 混合被动控制体系可以有效解决高层减隔震结构目前所存在的位移超限、结构整体倾覆等问题, 对不同频域地震波激励下的结构响应均有更为优越的控制效果。

关键词: 隔震结构; 相邻结构; 混合被动控制; 分段隔震; 振动台试验; 中间隔震层

中图分类号: TU352.1; TU973.3⁺¹ **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)01-0001-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.01.001

引言

现代城市中, 由于人口密度提高、土地资源日益减少等原因, 存在大量紧密排列的多层、高层建筑群, 这些多高层建筑大多存在个体差异或建造期先后不一, 缺乏整体设计, 导致各结构单体动力特征存在显著不同, 以至于无法实现振动的协调(非同步振动)。当相邻的建筑物间防震缝宽度达不到振动隔离的限值时, 结构可能会发生碰撞^[1]。而这其中, 最为典型的是采用隔震技术的高层建筑物在地震作用下(尤其是长周期地震动)的水平位移可能会远大于相邻非隔震建筑, 使得碰撞的可能性急剧增加^[2]。这时, 如果将隔震结构与相邻的非隔震结构通过被动耗能减震装置连成新型混合控制体系, 优化体系的控制参数, 就可以结合隔震和减震的优点, 联合抑制或减小其相邻结构的振动, 达到相互控制的目的。而且, 隔震和被动耗能减震的机理不同, 相比单一类型的被动控制装置, 将这两种不同类型的被动控制装置适当混合, 可能会在更宽的频域范围内降低地震激励对结构的危害^[3]。

在隔震系统中, 通常以牺牲隔震层的较大位移为代价, 使结构的附加加速度降低。为了满足这种位移需求, 设计者必须提供较大的水平隔离缝。但是对于要求设置的水平隔离缝有限的结构, 可能会使基础隔震技术的应用受到限制^[4]。层间隔震作为一种解决方案, 可以在现有结构中增加附加层而不显著增加现有结构的侧向力需求^[5-6], 解决了隔震技术在高层建筑上应用的某些局限性。

2003年9月26日, 在日本十胜近海发生了8.0级地震, 距震中约250 km的苦小牧市内发生了石油油罐火灾, 主要是由于罐内液体晃动的自振周期(5~12 s)与地面震动的特征周期(7~8 s)相近^[7], 从而引起了共振现象。2011年东日本大地震中, 中日联合考察团^[8]同样发现大阪某长周期结构, 距离震源770 km, 由于建筑物和地基卓越周期接近而发生共振, 使得其地震反应和距震源100 km的仙台差不多。赵益彬等^[9]对某有工程背景的高层隔震结构进行了长周期地震动下的响应分析, 发现“在长周期地震作用下, 高层隔震结构在小震和大震下都很难满足设计要求”。吴应雄等^[10]通过对某高层隔震结构进行在近、远场长周期地震动下的研究, 发现“远场

收稿日期: 2020-06-25; **修订日期:** 2020-10-13

基金项目: 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室开放基金资助项目(2019D01); 国家自然科学基金面上项目(52078395); 国家自然科学基金重点项目(51838006)。

长周期地震动下隔震结构的响应明显大于普通周期地震动;近场脉冲长周期地震动作用下结构减震效果较差,隔震层位移明显大于位移容许值”。

包含被动耗能系统的建筑结构对长周期和长持时地震动的控制效果却是十分有效的^[11-13],但是它们未必对脉冲式地震动(尤其是高频脉冲)有效^[14-17]。这是由于脉冲型近断层地震具有明显的长持续时间脉冲,因此与非脉冲型近断层和远场地震相比,它们可以在基础隔震系统中引起更大的变形^[17]。Xu等^[16]的研究指出,被动耗能装置的性能与脉冲激励的周期密切相关,当脉冲周期小于结构自振周期时(高频脉冲),被动耗能装置有可能会放大结构的位移、加速度和输入能。Ge等^[17]曾对连接被动耗能装置的相邻结构进行过近断层地震作用下的控制性能分析,发现在强速度脉冲作用时,结构第一个响应峰值最大,此时阻尼器对峰值的削弱作用并不明显。吴巧云等^[18-19]在对连接耗能装置的相邻结构进行近断层地震作用下的易损性分析时也曾发现:当相邻结构处于生命安全极限状态时,阻尼器具有一定的控制效果;但当结构状态超过此极限时,连接阻尼器有可能反而会放大相邻结构的动力响应。这是因为这些带有被动耗能装置的结构不一定能即时、有效地抵抗脉冲型地震动(如近断层地震动)的冲击输入,其耗能作用需要滞回运动才能体现。

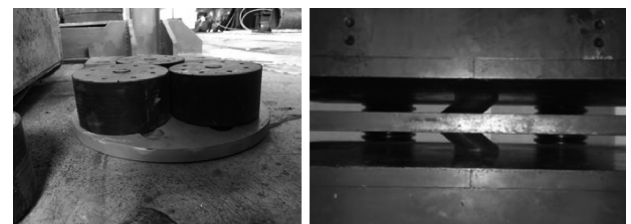
以上两个问题的解决在减隔震设计领域备受关注^[20-22]。本文提出一种混合减隔震体系,该体系将层间隔震建筑与另一个非隔震相邻建筑用阻尼器(油阻尼器、黏滞或黏弹性阻尼器等)连接,通过振动台试验重点研究改变中间隔震层布置位置对结构整

体振动控制效果的影响,并采用数值模拟予以验证。隔震建筑物易受长周期地震动的影响,而阻尼器连接的相邻建筑物易受高频脉冲地震动的影响,采用该混合被动控制体系的建筑物对两种类型的地面运动都是有效的,使该结构体系能更加安全地适用于频域更广的地震地面运动。

1 减隔震装置的力学特性

1.1 隔震支座的力学特性

试验采用的铅芯橡胶隔震支座如图1(a)所示。在试验前,对隔震支座进行了压剪性测试研究,如图1(b)所示,确定了隔震支座在预期的加载作用下能承受的最大位移,并考虑了结构系统倾覆的影响,取性能最接近设计要求的8个支座供试验使用。根据《建筑隔震设计标准 GB/T 51408—2020》,隔震支座的水平最大变形不应大于其有效直径的0.55倍和支座内部橡胶总厚度3倍二者的较大值,即支座水平位移应在55 mm以内,隔震支座各项性能参数测试结果如表1所示。支座设计面压为5 MPa。



(a) 隔震支座 (b) 支座力学性能测试
(a) Isolation rubber bearing (b) Mechanical performance test of the bearing

图1 隔震支座力学性能测试

Fig. 1 Mechanical properties test of isolation rubber bearings

表1 隔震支座性能参数

Tab. 1 Performance parameters of isolation bearings

支座参数	参数值	支座参数	参数值
剪切模量 G/MPa	0.392	铅芯直径/mm	18
有效直径 d_0/mm	100	第一形状系数 S_1	16.25
总高度(不含连接板) h_0/mm	49	第二形状系数 S_2	5.56
封钢板厚 t_f/mm	8	竖向压缩刚度 $K_v/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	123.3
橡胶层厚度 t_r/mm	2	屈服前刚度 $/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	1.70
橡胶层数 $n_r/\text{片}$	9	设防地震水准对应的100%剪切变形下的水平等效刚度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.404
钢板层厚度 t_s/mm	1	屈服力/kN	0.628
钢板层数 n_s	8	屈服后刚度 $/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.169

1.2 阻尼器力学特性

试验设计了一种黏滞阻尼器,由两端的固定部件和黏滞阻尼器部分组装而成,长度为700 mm,最

大行程为 ± 60 mm。对于参数设置中的阻尼系数 c ,其取值与阻尼器液体材料及温度相关,阻尼指数为速度指数,其取值与阻尼器运动的相对速度相关。

当 η 较小时,阻尼器耗能能力较强,同时,阻尼力也较大,根据经验一般取0.3~1.0;当结构位移较大或受力较大时,可通过取值改变阻尼器参数(速度指数或阻尼系数)或数量进行调整。本文根据振动台试验工况、场地条件及阻尼器制作加工精度,最终确定阻尼系数 $c=200\text{ N}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$,速度指数 $\eta=0.5$ 。为保证阻尼器的安装和拆卸过程操作简单,将阻尼器两端设计成带有销头的样式,故只需要调整中间螺栓就能实现阻尼器的拼卸,两端的组合构件直接焊接在两相邻框架结构之间。阻尼器的主要参数如表2所示。

表2 黏滞阻尼器的参数

Tab. 2 Parameters of the viscous damper

型号	阻尼系数 $c/[\text{N}\cdot(\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}]$	阻尼 指数	最大阻尼 力/kN	最大行 程/mm	极限行 程/mm
JZN5X	200	0.5	5	60	90

2 实验设计与设置

2.1 概述

出于中间隔震层位置变换的不同工况,为便于起吊安装,试验设计并制作了一套单层单跨钢框架结构,它可加载的形式多样,可以通过不同的组装方式和层间隔震布置方式改变不同的试验工况,以评估中间隔震层所在不同工况、不同布置位置下对整体结构动力响应的影响。本试验依托华中科技大学工程结构分析与安全评定湖北省重点实验室现有的 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 双向振动台进行,最大负载15 t,工作频率范围为1~50 Hz。振动台能够在10 t的最大载荷作用下产生1g的最大水平加速度,最大速度和位移分别为0.5 m/s和 $\pm 10\text{ cm}$ 。试验模型和设想原型结构长度相似比为1:16,加速度相似比1:1,时间相似比1:4,为真实反映高层结构特性,采用相似关系设计试验模型,相似关系如表3所示。隔震层采用4个铅芯橡胶隔震支座(LRB)分别布置于4个柱子下方,计算面压为1.57 MPa,符合文献[23]的设计要求,隔震结构安全。阻尼器采用焊接方式,将两端固定部件焊制在钢框架上,不需要连接阻尼器时,阻尼器可拆卸,附加配重采用预制混凝土块,根据相似关系附加于每层结构上。试验所有部件均为试验定制,包括框架、连接板件、隔震支座、阻尼器等,所有部件的设计总重量约12 t。

表3 试验模型各相似比

Tab. 3 Similarity ratios of experimental models

物理量	符号	量纲	相似系数
长度	S_l	L	1/16
弹性模量	S_E	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$	1
刚度	S_k	MT^{-1}	1/16
加速度	S_a	L/T^2	1
时间	S_T	T	1/4
速度	S_v	L/T	1/4
位移	S_x	L	1/16
质量	S_m	M	1/256
阻尼系数	S_c	M/T	1/64
阻尼力	S_F	ML/T^2	1/256

2.2 试验钢框架模型设计及组装

本试验设计制作了7个单层单跨钢框架,每层钢框架尺寸长1.6 m,宽0.8 m,高0.8 m。主结构A为4层,整体结构高3.2 m,从结构B为3层,整体结构高2.4 m。主、从结构高宽比分别为4和3。主结构因需进行多次试验工况的变换,采取单个框架结构拼接形成主体结构的方式进行试验,如图2所示,支座上部结构高宽比考虑3,2,1三种工况。每层钢框架结构采用《钢结构设计规范》标准截面^[24]:柱和梁均采用等边角钢 $\text{L}110\text{ mm}\times 110\text{ mm}\times 10\text{ mm}$;为提高结构的抗震承载力,梁与柱的连接均采用焊接,避免开孔影响结构整体稳定性,并在梁与柱连接处焊接连接板件以增大焊缝长度。

为保证结构模型质量符合相似关系,采用混凝土块作为配重块用于模拟真实结构荷载,设计配重块单块质量为72 kg,叠加布置在每层结构上,并采用紧固器固定防止试验过程中产生晃动,同时采用木块将配重块与钢框架的间距填满(如图3所示)。需要更换中间隔震层位置时,采用实验室桥式起重机吊起上部结构(如图4所示),拆装层间隔震支座。试验模型中每层附加配重约1.3 t,主结构总重约6.8 t。

2.3 数据采集及传感器布置

在振动台试验中,安装了传感器来监测试验结构的位移、加速度。由于激光位移传感器只能固定于振动台一侧的架子上,故只能记录主结构的楼层位移。第一层钢框架下部梁上布置一个测点,以记录隔震结构基础隔震层的位移变化情况;主结构每层至少布置一个位移测点,如有层间隔震层的工况,隔震层上下各布置一个位移测点,共6个测点。加速度传感器在振动台台面设置2个测点,用于监测振动台台面输入加速度;主结构底层柱脚设置2个

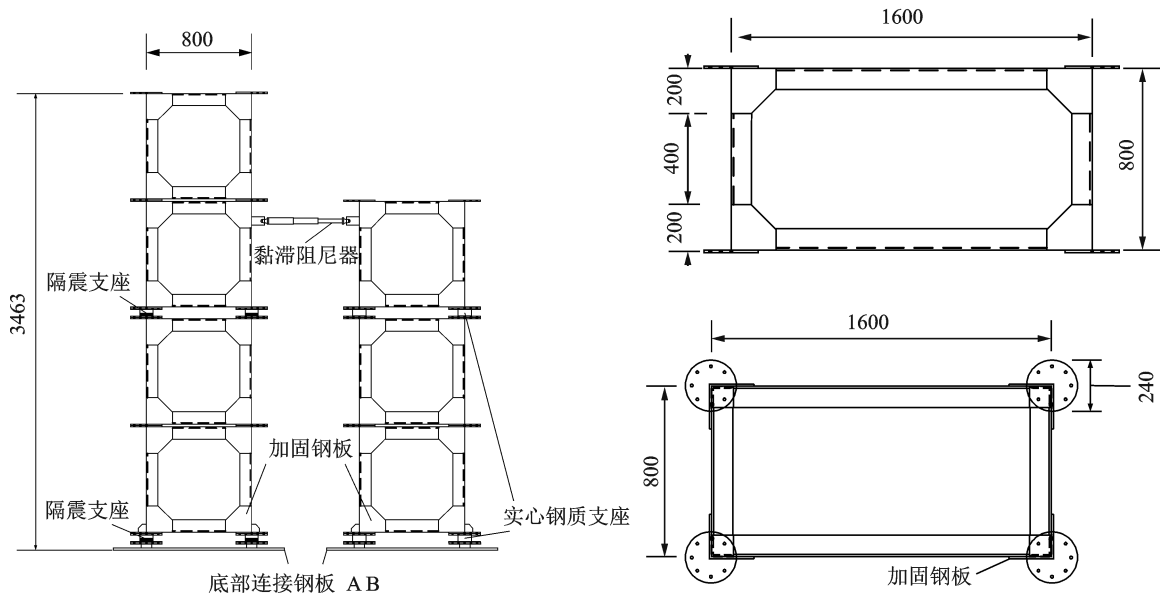


图2 试验模型及钢框架结构设计图(单位:mm)

Fig. 2 Design drawing of test model and steel frame structure(Unit:mm)

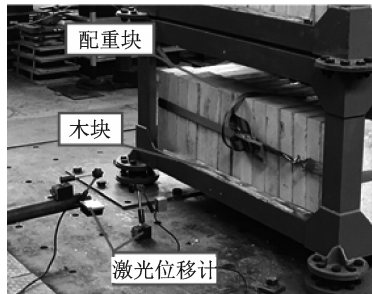


图3 每层配重布置

Fig. 3 Additional weight on each floor



图4 更换工况作业

Fig. 4 Change the test model

(a) 激光位移传感器测点布置
(a) Layout of measuring points of laser displacement sensor(b) 加速度传感器测点布置
(b) Layout of measuring points of accelerometer

图5 测点布置

Fig. 5 Sensor arrangement

测点,用于记录结构基础部位加速度;主结构每层设置2个加速度测点,用于验证传感器的灵敏度和准确性,再取均值作为该处的实际加速度;从结构原则上每层设置一个加速度测点。共计设置15个加速度测点,测点布置如图5所示。

2.4 试验工况

层间1-2、层间2-3、层间3-4分别表示层间隔震结构中间隔震层在主结构第一层顶部、第二层顶部、第三层顶部三种工况。因振动台限制及考虑到安全性,仅输入峰值加速度为 $0.2g$ 的地震波,考虑到模型反馈可能会导致输入波的信号改变,故每种地震波输入前都会输入白噪音进行扫频,以监测结构是否损伤。所有地震记录均在时间上压缩了4倍,以匹配缩尺模型时间尺度对结构原型的影响。具体工况如图6和图7所示。

3 振动台试验结果及分析

3.1 地震波反应谱特征

本文研究重点在于结合分段隔震与相邻建筑物连接耗能的混合被动控制系统在不同类型地震波激励下的结构动力响应,因此在选取物理试验使用的地震波时,根据地震波的特征周期的长短,近场、远场的分类以及是否含有脉冲效应等特点,选取一条普通周期地震波对比验证长周期地震波的影响;选取一条近场脉冲长周期地震波和一条近场非脉冲长周期地震波对比验证脉冲效应的影响;最后选取一条远场长周期地震波对比验证远场地震波的影响。因此选取了4条不同类型的地震波,普通周期地震

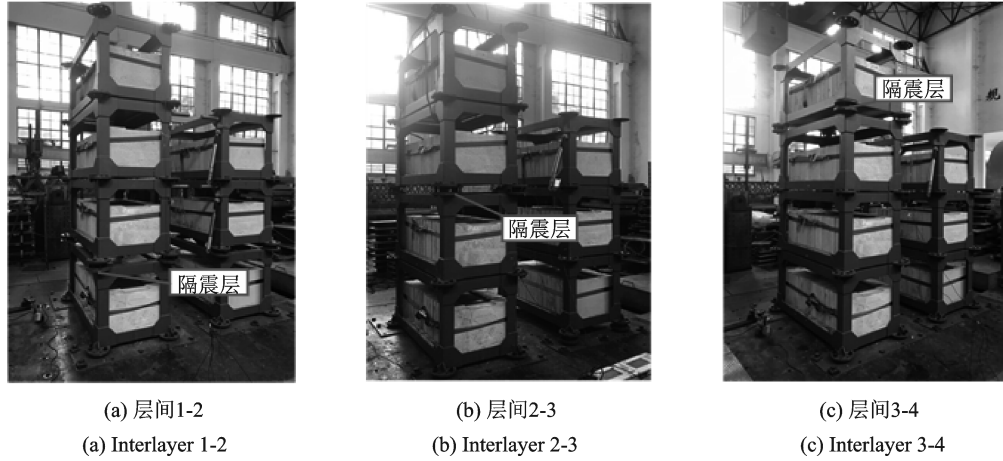


图 6 分段隔震无阻尼器工况

Fig. 6 Section isolation without damper

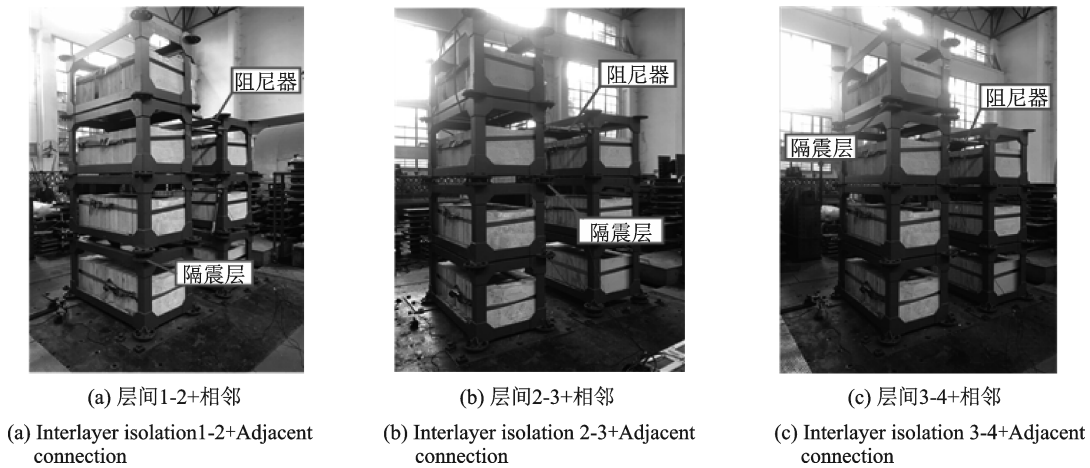


图 7 分段隔震有阻尼器工况

Fig. 7 Section isolation with dampers

波 El-Centro、近场长周期地震波 TCU-078、远场长周期地震波 TCU-115、近场脉冲长周期地震波 EMO-270,地震波加速度时程如图 8 所示。4 条地震波详细信息如表 4 所示。

采用 Seismo 系列软件对表 4 中地震波进行频谱处理,得到 5% 阻尼比条件下各条地震波的加速度、速度和位移反应谱,如图 9 所示。

从图 9(a)中可以看出,普通周期地震波 El-Centro 加速度在 2 s 内就已经迅速衰减,而长周期地震波 TCU-078, TCU-115, EMO-270 衰减较慢,并且 4 s 后加速度仍然很大。从图 9(b)中可以看出普通周期地震波 El-Centro 在 1 s 周期左右达到速度峰

值,约 52 cm/s;而长周期地震波继续增大,速度峰值约为普通周期地震波的 3~5 倍;从图 9(c)中可以看出普通周期地震波位移反应较小,无明显变化趋势;而长周期地震波尤其是远场长周期地震波其位移反应谱呈大幅增长。

3.2 结构位移响应分析

按试验方案顺序输入 El-Centro, TCU-078, TCU-115, EMO-270 地震波,输入每条地震波前采用白噪音扫频,检查结构损伤情况,再将试验地震波输入峰值调整至 0.20g,并在每次试验中,得到混合被动控制体系中分段隔震结构的楼层位移响应,如

表 4 地震波信息

Tab. 4 Seismic wave information

地震波类型	台站	PGA/g	PGV/(cm·s ⁻¹)	PGV/PGA	PGD/cm	断层距/km
普通地震波	El-Centro	0.342	38.13	0.11	0.11	6.09
近场长周期波	TCU-078	0.20	20.7	0.10	80.73	0
远场长周期波	TCU-115	0.22	74.71	0.34	51.09	37.7
近场脉冲长周期波	EMO-270	0.291	90.68	0.31	34.47	0.07

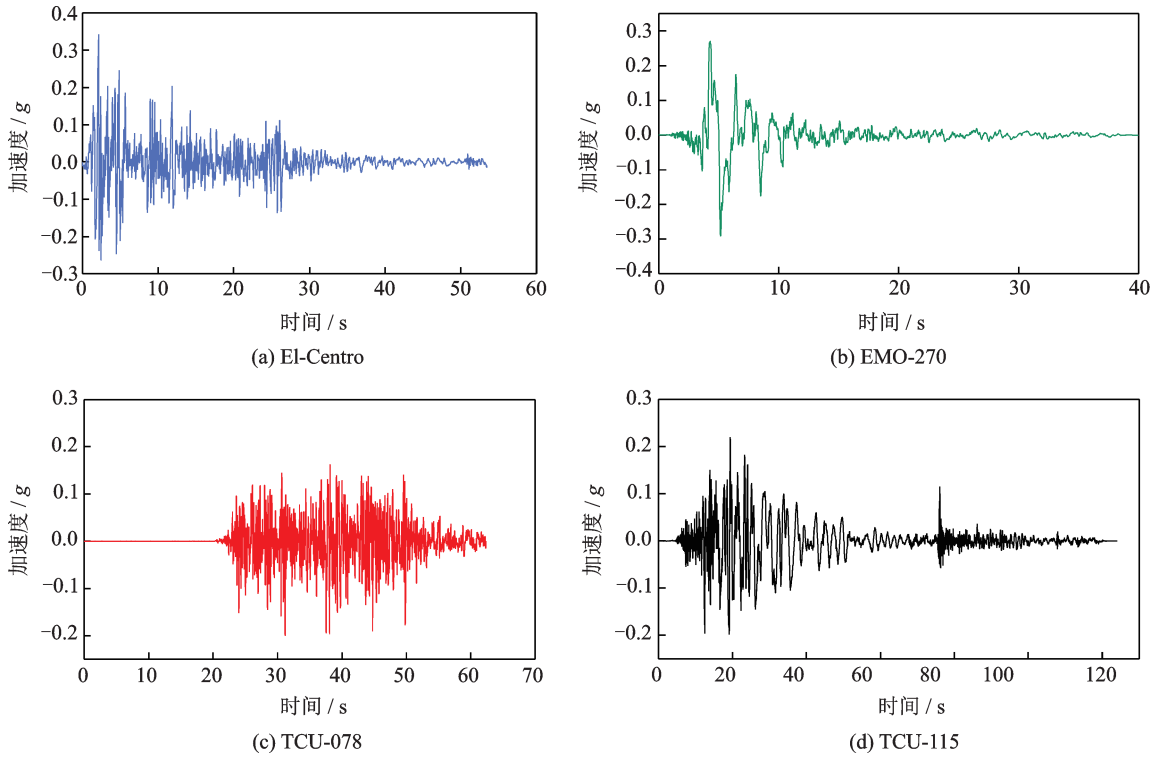


图8 试验用地震波

Fig. 8 Test seismic wave

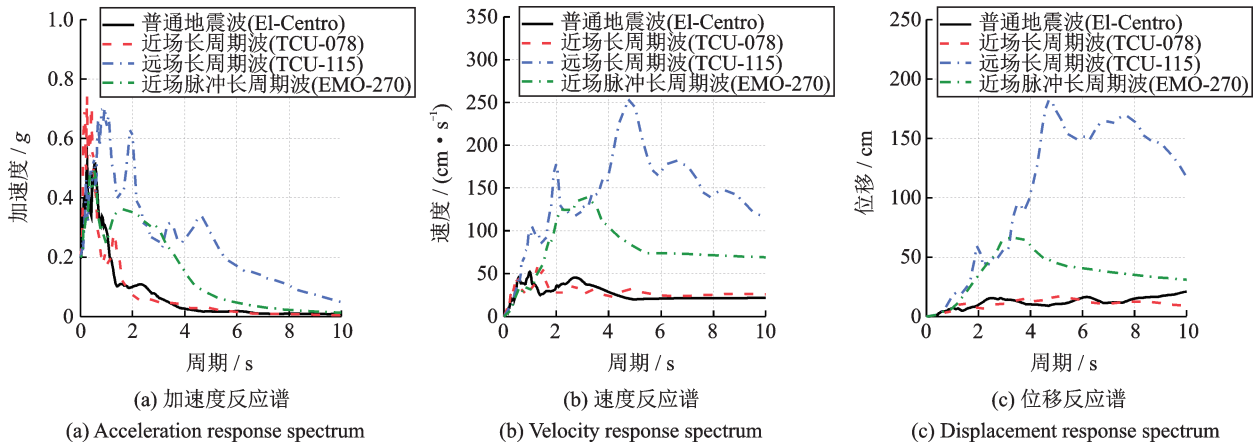


图9 5%阻尼比下所选地震波反应谱

Fig. 9 Seismic response spectrum at 5% damping ratio

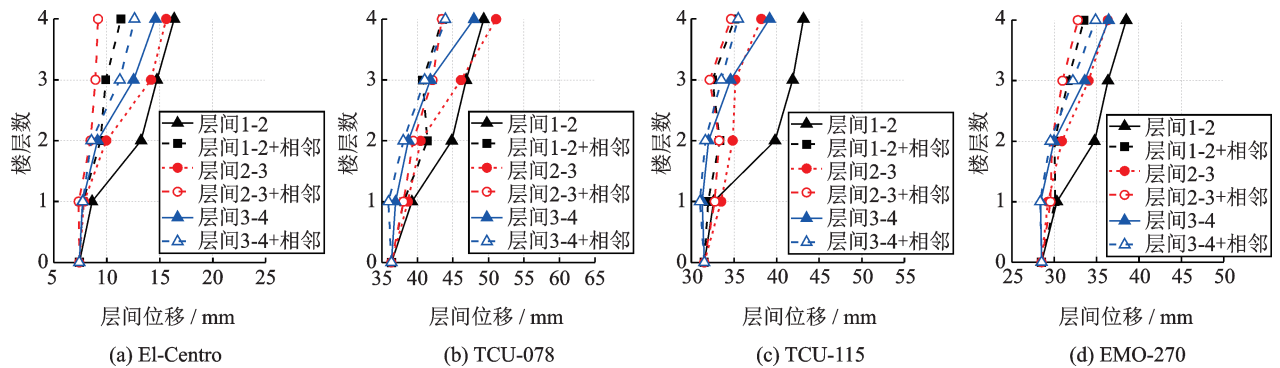


图10 4条波下隔震结构位移

Fig. 10 Structural displacement under excitation of the four seismic waves

图10所示。图11给出了El-Centro波下分段隔震结构顶层位移时程曲线。

从图10中可以看出,隔震结构的楼层位移主要集中在隔震层;对于层间隔震1-2,楼层位移集中在

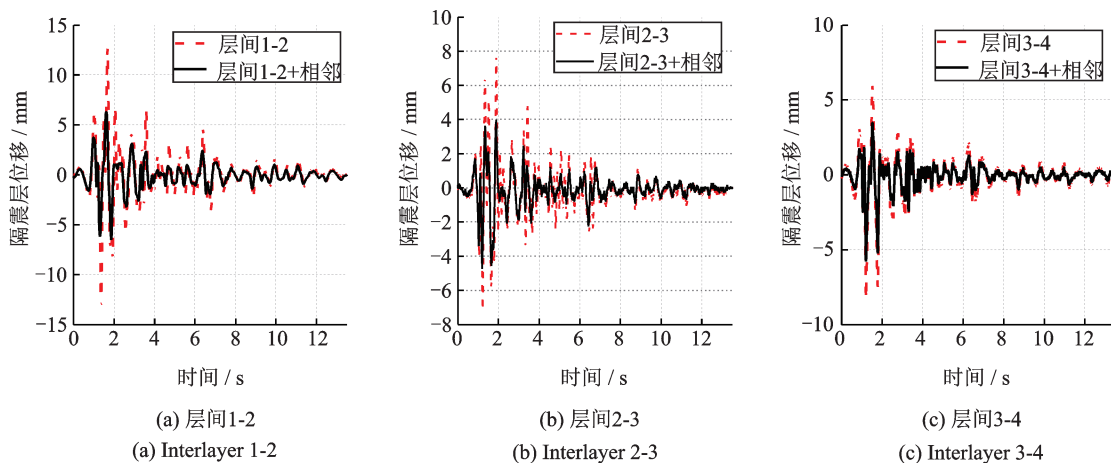


图 11 El-Centro 激励下隔震支座位移

Fi. 11 Displacement of the bearing under El-Centro excitation

第一层与第二层间,当连接阻尼器后,中间隔震层支座位移减小了 50% 左右,控制效果明显。但同时,由于此工况的中间隔震层布置位置较低,上下部结构质量比较大,所以中间隔震层的变形会明显大于基础隔震层位移,且在试验中,倾覆趋势最为明显,在实际工程中需要考虑隔震支座出现受拉的可能。层间 2-3 的中间隔震层位于结构中,上下部结构质量比近似于 1:1,结构主要楼层位移大体上均布于两个隔震层中,可充分利用两个隔震层的变形限值降低结构在大震下的支座变形超限的可能,有更大的变形预留量,并且上下部结构以平动为主,楼

层间相对位移较小。层间 3-4 的中间隔震层位于靠上部,在未连接阻尼器时,可以近似看作谐调质量阻尼器(TMD)。可以很明显地看出,在四种类型的地震波激励下,层间 3-4 的顶层位移均明显较大。但是连接阻尼器以后,阻尼器可以发挥出耗能性能,尤其是对上部结构(顶层)仍有一定控制效果。

为了更直观明确地表达出混合被动控制体系对隔震支座变形的控制效果,图 11,12 给出了层间隔震结构隔震支座在普通波(El-Centro)和长周期波(TCU-115)激励下的支座位移时程图。

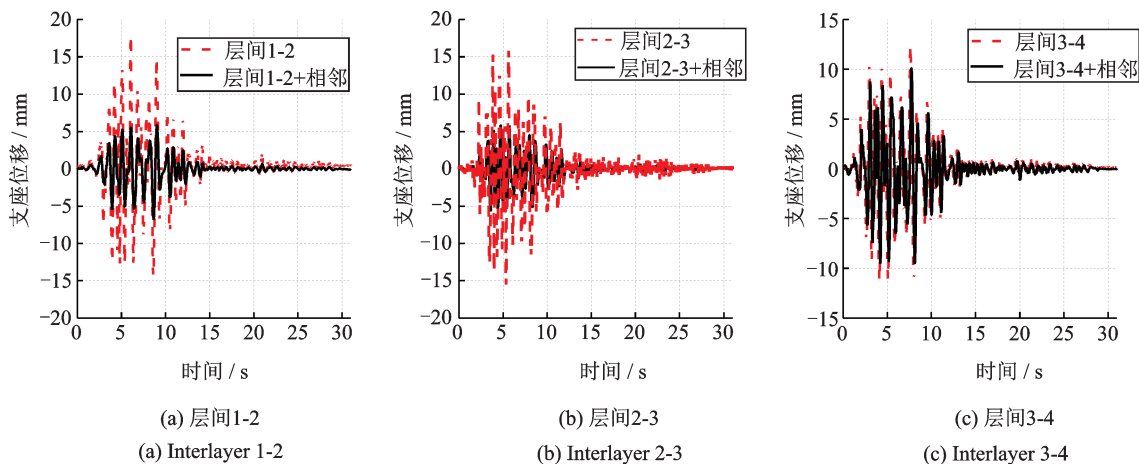


图 12 TCU-115 激励下隔震支座位移

Fig. 12 Displacement of the bearing under TCU-115 excitation

从图 11 和 12 中可以看出:在不同类型的地震波激励下,相对于普通地震波(El-Centro),长周期波对结构变形的影响更为明显,一方面是振动台台面(地面)会有更大的位移;另一方面结构每一层的相对位移和隔震支座位移都有明显增大:在 0.2g 加速度下,远场长周期波(TCU-115)使结构基础隔震层支座产生的最大位移为普通波的 2 倍左右;且由于变形的增大,阻尼器的限位作用效果更为明显,但在层间 3-4 工况下,由于阻尼器并没有限制上(顶部)

结构的位移,阻尼器并无明显控制效果。同时,在长周期波激励下,支座的限位效果由普通波激励下的 30%~50% 增加到 60%~70%。由此可以看出,长周期波,尤其是长周期脉冲波对于高层隔震结构(长周期结构)的影响需要引起重视,混合控制体系对结构和支座位移控制效果有着明显优势。

3.3 结构加速度响应分析

图 13 给出了在 4 种不同类型地震波激励下分段

隔震结构各楼层的峰值加速度。可以看出在长周期波 TCU-078, TCU-115 激励下, 结构的整体加速度明显大于普通波 El-Centro 激励下结构楼层加速度; 同时, 在 El-Centro 波激励下, 连接阻尼器后, 上部结构的楼层加速度均有不同程度的放大效应 (如图 13 (a) 所示)。但在 TCU-078, TCU-115 激励下, 连接阻尼器后结构的楼层加速度有大幅减小。如图 13 (b) 所示, 当中间隔震层位置较低时, 倾覆的趋势依然很明显, 上部结构加速度沿结构高度方向逐渐增大。

当隔震层设置于靠结构中部时, 连接阻尼器对下部结构加速度控制效果不太理想 (在 El-Centro 波下, 甚至略微放大了下部结构加速度), 但对上部结构的加速度控制效果却是最好的。当中间隔震层位于顶层时, 结构顶层的加速度较大, 且连接阻尼器后仍无法得到较好控制效果。

图 14, 15 展示了 3 组对比工况在普通波 El-Centro 和长周期波 TCU-115 激励下分段隔震结构顶层加速度时程。在连接阻尼器后, 控制效果是截然不

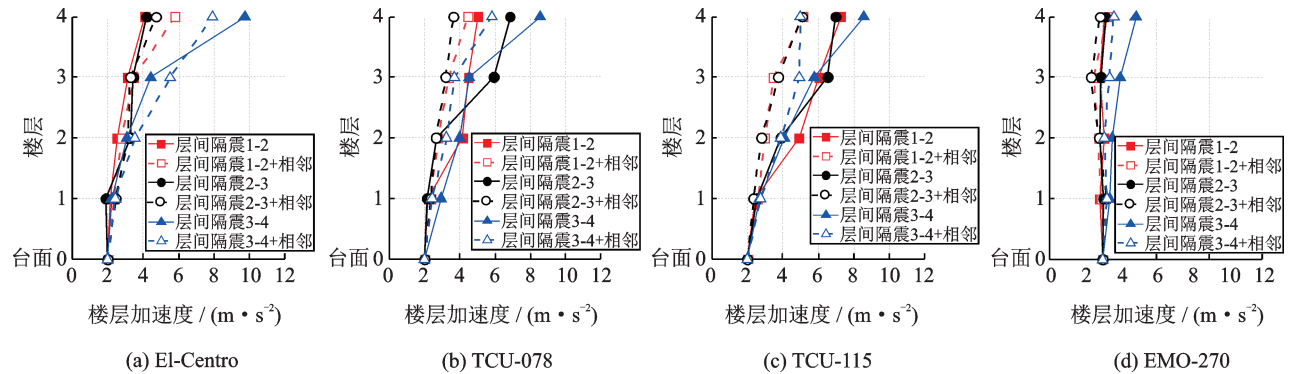


图 13 4 条地震波下隔震结构加速度

Fig. 13 Structural acceleration of the isolated structure under excitation of the four seismic waves

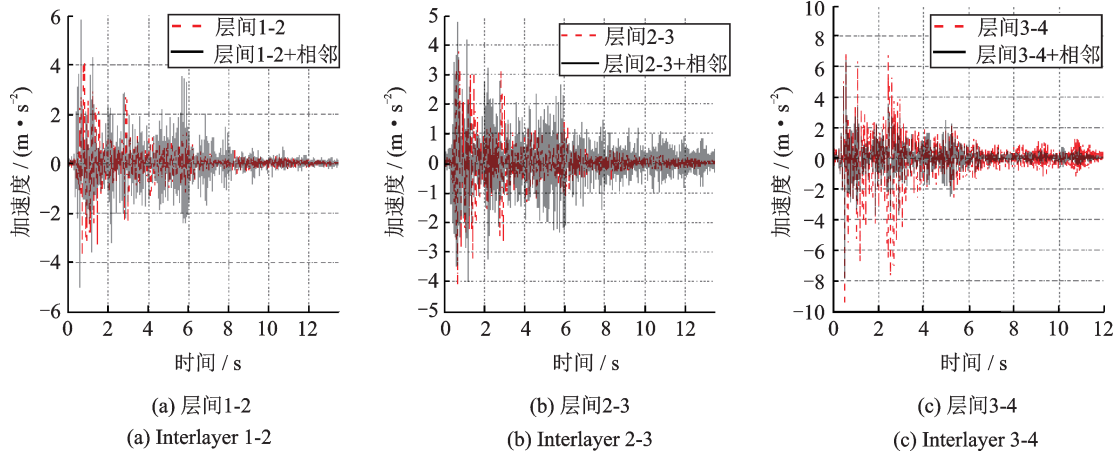


图 14 El-Centro 作用下隔震结构顶层加速度

Fig. 14 Top layer acceleration of the isolated structure under the excitation of El-Centro

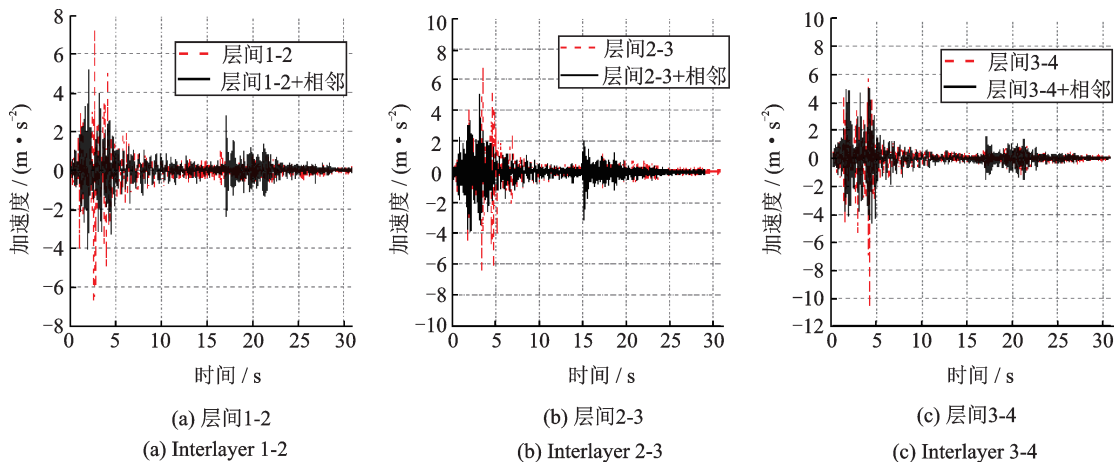


图 15 TCU-115 作用下隔震结构顶层加速度

Fig. 15 Top layer acceleration of the isolated structure under the excitation of TCU-115

同的:普通波激励下反而会放大结构的加速度响应。相反,长周期波激励下,结构顶层加速度大幅降低,在图 15(b)中,层间 1-2 工况(a)和层间 2-3 工况(b)结构顶层加速度的对比中尤为明显。如图 15(c)所示,层间 3-4 工况的对比中,由于顶层类似于 TMD 系统,加速度并没有得到很好的控制效果。同时,在加速度峰值处得到了最好的减震效果。在较小的振动下,阻尼器可能会略微放大结构的加速度,这是由于当振动较小时,阻尼器抑制了结构间的相互运动趋势,会使结构加速度略微放大,但由于此时加速度很小,并不会对结构造成损伤。

通过以上对比分析可以看出,混合减隔震体系针对隔震建筑在高频短周期脉冲地震波激励下有较好的隔震效果,但在长周期地震动下效果可能较差;而连接被动耗能系统(阻尼器)的相邻结构在长周期、长历时地震动下有较好的控制效果,但在脉冲型地震动下效果可能较差,如果将隔震和减震组合,采用混合被动控制系统的建筑物在上述两种类型的地震波激励下都是有效的,能更加安全地适用于更宽频域内的地震地面运动。

4 数值模拟与试验对比

采用有限元软件 Etabs 进行数值模拟,软件的程序中预置了几种主流的非线性连接单元,可以定义连接单元的属性来模拟隔震装置和阻尼器。为了更好地反映混合被动控制体系中中间隔震层位置对结构控制效果的影响,本文采用有限元软件 Etabs 对缩尺模型的 6 种试验工况进行建模,并输入相应地震波进行结构仿真,分析不同隔震体系、不同中间隔震层布置方案对模型结构大指标的影响。对非隔震结构(非隔震结构模型)底部和基础采用固定节点约束(限制六个方向的自由度)。针对隔震支座在 Etabs 中的模拟,可采用“Rubber Isolator”连接单元,对连接相邻结构的工况采用多塔模式分别建立主结构及从结构模型。针对阻尼器单元在 Etabs 中的模拟,可采用自带的连接单元“Damper-Exponential”模拟,先画辅助线,连接属性是根据试验采用的阻尼器类型确定的(基于阻尼器指数选择阻尼器类型)。图 16 为层间隔震结构和混合控制结构的有限元模型。

4.1 自振周期

对振动台试验的缩尺模型进行有限元数值模拟,通过试验时输入白噪声检测结构的自振特性,并与数值模拟得到的高阶自振周期进行对比分析,结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,当主结构中间隔震层位置为

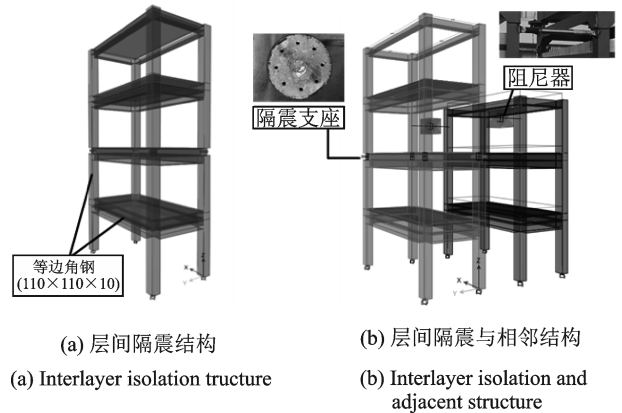


图 16 有限元模型(单位:mm)
Fig. 16 Finite element model(Unit:mm)

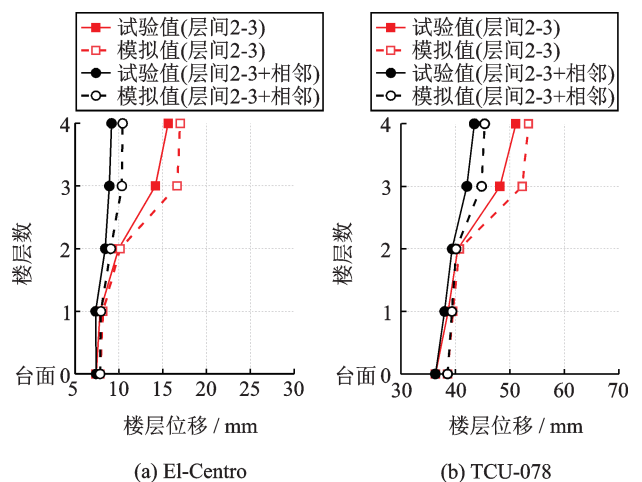
表 5 自振周期对比
Tab. 5 Comparison of natural vibration periods

模型结构	模拟值/s	试验值/s	误差/%
层间 1-2	0.504	0.551	9
层间 2-3	0.443	0.496	12
层间 3-4	0.302	0.342	13

第一层顶部时,自振周期试验值为 0.551 s,相比其他隔震方案的自振周期更长,即对于本试验模型,当中间隔震位置较低时,周期延长较多,且随着中间隔震层位置的升高结构自振周期延长量逐渐减少。试验得到的结果与数值模拟结果的误差基本保持在 10% 左右,模型的制作与理想状态接近。

4.2 试验与数值模拟分析比较

将所有试验模型的加速度和层间位移测试结果与数值模拟结果进行了对比。重点关注结构的加速度和楼层位移,图 17 展示了层间 2-3 工况与其连接相邻结构工况的位移对比图;图 18 展示了层间 2-3 工况与其连接相邻结构工况的加速度对比图。结果显示试验测试数据与有限元模拟结果之间有着良好的匹配结果,最大误差在 20% 左右。



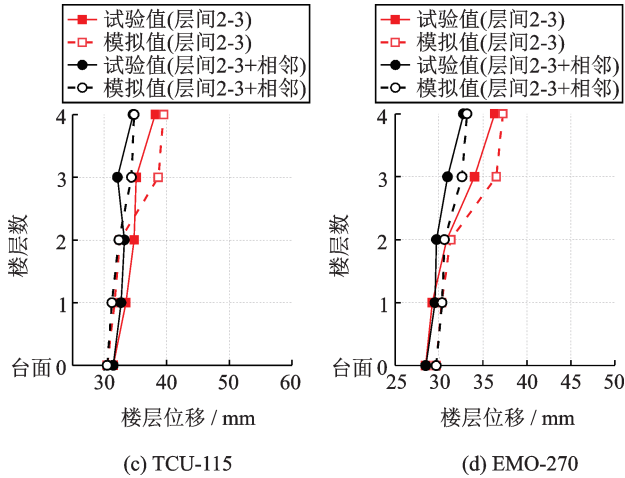


图17 4种地震波下位移对比

Fig. 17 Comparison of displacement under four kinds of seismic waves

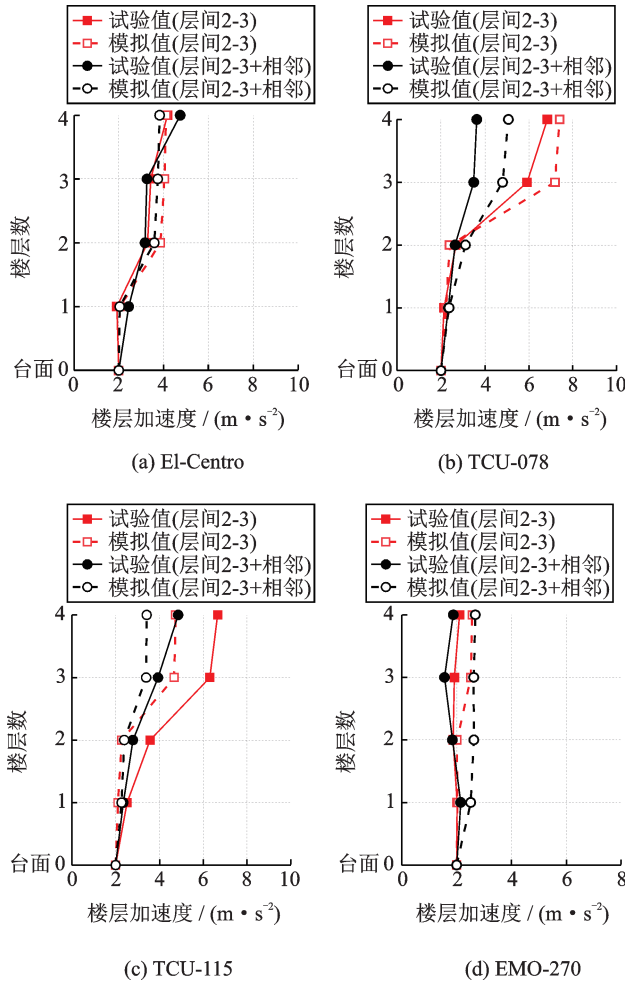


图18 4种地震波下加速度对比

Fig. 18 Comparison of acceleration under four kinds of seismic waves

5 结论

本研究提出了一种混合被动控制体系,研究了层间隔震结构中中间隔震层位置变化对控制效果的影

响。通过振动台试验及有限元模拟仿真得出以下结论:

(1)分段隔震结构在长周期地震波激励下,会产生更大的支座位移,若中间隔震层位置较低,需要更重视隔震支座的变形限值 and 上部结构的倾覆问题,并且支座可能会产生拉应力。

(2)混合控制体系对高层隔震结构的抗倾覆、支座变形限位均有明显的控制效果,进一步提高了隔震结构的安全性。同时相邻结构间阻尼器起到了良好的缓冲作用,可有效降低结构加速度。

(3)中间隔震层布置位置对上部结构的位移和加速度响应有显著的影响,当隔震层布置在结构竖向靠近中部时,对层间位移角的控制效果较好,振动控制和支座位移达到一个相对均衡的状态。

(4)混合被动控制结构在不同频域地震波激励下有着截然不同的减隔震效果,相对于单一的减隔震结构,混合控制体系在不同频域地震动激励下有着更好的优越性和鲁棒性。

本文研究仅基于物理模型和有限元模型在4种不同类型地震波激励下的动力响应分析,结论具有一定的局限性,接下来会进行更为全面、更具普遍性的研究。

参考文献:

- [1] Kasai K, Maison B F. Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake [J]. Engineering Structures, 1997, 19(3): 195-207.
- [2] Polycarpou P C, Komodromos P. Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures [J]. Engineering Structures, 2010, 32: 1937-1951.
- [3] Murase M, Tsuji M, Takewaki I. Smart passive control of buildings with higher redundancy and robustness using base-isolation and inter-connection [J]. Earthquake and Structures, 2013, 4(6): 649-670.
- [4] 丁永君, 张光宁, 李进军. 大高宽比高层结构基础隔震应用与研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(2): 93-99.
- [5] Ding Yong-jun, Zhang Guang-ning, Li Jin-jun. Base-isolated application and research on large height-width ratio high-rise structures[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(2): 93-99.
- [6] Dutta A, Sumincht J, Mayes R, et al. An innovative application of base isolation technology[C]. 18th Analysis and Computation Specialty Conference, ASCE

- Structures Congress, Vancouver, BC, Canada, 2008: 18-20.
- [6] 周福霖,张颖,谭平.层间隔震体系的理论研究[J].土木工程学报,2009,42(8):1-8.
Zhou Fulin, Zhang Ying, Tan Ping. Theoretical study on story isolation system[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(8): 1-8.
- [7] Takewaki I, Fujita K, Yoshitomi S. Uncertainties in long-period ground motion and its impact on building structural design: case study of the 2011 Tohoku (Japan) earthquake [J]. Engineering Structures, 2013, 49: 119-134.
- [8] 周福霖,崔鸿超,安部重孝,等.东日本大地震灾害考察报告[J].建筑结构,2012,42(4):1-20.
Zhou Fulin, Cui Hongchao, Shigetaka ABE, et al. Inspection report of the disaster of the East Japan earthquake by Sino-Japanese joint mission [J]. Building Structure, 2012, 42(4): 1-20.
- [9] 赵益彬,吕西林.高层隔震结构在长周期地震动作用下的响应分析[J].结构工程师,2016,32(3):77-85.
ZHAO Yibin, LÜ Xilin. Structural response of high-rise base-isolated buildings under the action of long-period ground [J]. Structural Engineer, 2016, 32(3): 77-85.
- [10] 吴应雄,颜桂云,石文龙,等.长周期地震动作用下高层隔震结构减震性能试验研究[J].振动工程学报,2017,30(5):806-816.
WU Ying-xiong, YAN Gui-yun, SHI Wen-long, et al. Experimental study on the seismic-reduction performance of high-rise isolated structure under long-period ground motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(5): 806-816.
- [11] Takewaki I. Fundamental Properties of Earthquake Input Energy on Single and Connected Building Structures[M]// Lagaros N D, Tsompanakis Y, Papadrakakis M. New Trends in Seismic Design of Structures. Saxe-Coburg Publisher, 2015,1:1-28.
- [12] Takewaki I, Murakami S, Fujita K, et al. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(11): 1511-1528.
- [13] Takewaki I, Moustafa A, Fujita K. Improving the Earthquake Resilience of Buildings: The Worst Case Approach[M]. London:Springer, 2012.
- [14] Kasagi M, Fujita K, Tsuji M, et al. Effect of nonlinearity of connecting dampers on vibration control of connected building structures[J]. Frontiers in Built Environment, 2015, 1: 25.
- [15] 郭彦,刘文光,何文福,等.长周期地震波作用下超高层框架-核心筒减震结构动力响应分析[J].建筑结构学报,2017,38(12):68-77.
GUO Yan, LIU Wenguang, HE Wenfu, et al. Dynamic response analysis of super high-rise frame-core tube structure under long-period ground motions[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(12): 68-77.
- [16] Xu Z, Agrawal A K, He W L, et al. Performance of passive energy dissipation systems during near-field ground motion type pulses[J]. Engineering Structures, 2007, 29: 224-236.
- [17] GE Dongdong, ZHU Hongping, Chen Xiaoqiang, et al. Performance of viscous fluid dampers coupling adjacent inelastic structures under near-fault earthquakes [J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17: 1336-1343.
- [18] 吴巧云,朱宏平.相邻结构在近远场地震作用下的易损性分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(2):1-7.
WU Qiaoyun, ZHU Hongping. Seismic fragility analysis of adjacent structures under near-field and far-field earthquakes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(2): 1-7.
- [19] Wu Q Y, Zhu H P, Chen X Y. Seismic fragility analysis of adjacent inelastic structures connected with viscous fluid dampers[J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(1): 18-33.
- [20] Zhao D, Liu Y, Li H. Self-tuning fuzzy control for seismic protection of smart base-isolated buildings subjected to pulse-type near-fault earthquakes[J]. Applied Sciences, 2017, 7(2): 185.
- [21] Petti L, De Iuliis G G M, Palazzo B. Small scale experimental testing to verify the effectiveness of the base isolation and tuned mass dampers combined control strategy [J]. Smart Structures and Systems, 2010, 6(1): 57-72.
- [22] Karabork T. Performance of multi-storey structures with high damping rubber bearing base isolation systems [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2011, 39(3): 399-410.
- [23] 叠层橡胶支座隔震技术规程:CECS 126—2001 [S].北京:中国工程建设标准化协会,2001.
Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber bearing isolators: CECS 126—2001 [S]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 2001.
- [24] 钢结构设计规范:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Standard for design of steel structures:GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

Experimental study on the influence of the position variation of intermediate isolation layer on the control effect of hybrid passive control system

WU Qiao-yun^{1,2,3}, LIU Zi-liang¹, YAN Hui-chao¹, HE Wan-cheng¹, ZHU Hong-ping⁴

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2.Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

3.Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

4.School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A type of hybrid passive control system with energy dissipation between isolated structures and adjacent structures is proposed. Compared with a single seismic isolation system, the proposed system has much stronger robustness to different frequency domain ground motions via combining isolation and damper energy consumption together. The influence of the location of the middle isolation layer on the isolation effect of the segmented isolated structure is studied by inputting different frequency domain ground motions through shaking table test. The finite element numerical simulation is compared with the experimental results. The results show that compared with other frequency-domain ground motions, the influence of long-period seismic wave on the response of the displacement and acceleration of isolated structure is more significant, which will increase the possibility of bearing overrun. The overall dynamic response of the structure is the minimum when the middle isolation layer is located in the vertical middle position of the structure. The hybrid passive control system can effectively solve the problems of displacement overrun and overall overturning of high-rise seismic isolation structures, and has better control effect on the structural response under different frequency-domain seismic excitations.

Key words: isolated structures; adjacent structures; hybrid passive control; multiple isolation; shaking table test; intermediate isolation layer

作者简介: 吴巧云(1985—),女,博士,教授。电话:15927588696;E-mail: wuqiaoyun@wit.edu.cn。

通讯作者: 朱宏平(1965—),男,博士,教授。电话:13995525076;E-mail: hpzhu@mail.hust.edu.cn。