



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782

CN 11-2021/P

不同时频特性近断层地震作用下的结构响应研究

韩森 赵鸣鹤 杜红凯 蒋金卫

Study on structural dynamic response under near fault ground motion with different time-frequency characteristics

Han Miao, Zhao Minghe, Du Hongkai, Jiang Jinwei

引用本文:

韩森, 赵鸣鹤, 杜红凯, 蒋金卫. 2022. 不同时频特性近断层地震作用下的结构响应研究. *地震学报*[J], 44(5): 911–919. DOI: 10.11939/jass.20220135

Han M, Zhao M H, Du H K, Jiang J W. 2022. Study on structural dynamic response under near fault ground motion with different time–frequency characteristics. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 911–919. DOI: 10.11939/jass.20220135

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220135>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地震动参数对边坡地震响应的影响规律

Influence law of ground motion parameters on soil slope seismic response
地震学报. 2017, 39(5): 798–805 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.013>

巴彦浩特地震台石英水平摆倾斜仪观测资料分析

Analyses on observation data of quartz horizontal pendulum tiltmeter at the seismic station Bayanhot, Inner Mongolia
地震学报. 2020, 42(1): 66–78 <https://doi.org/10.11939/jass.20180137>

水域隧道地震响应分析

Influencing factors for seismic responds of a subsea tunnel
地震学报. 2020, 42(2): 231–243 <https://doi.org/10.11939/jass.20190126>

不同注水方式下断层动力学响应数值模拟研究

The dynamic mechanical response of the fault under different water injection schedules
地震学报. 2021, 43(6): 730–744 <https://doi.org/10.11939/jass.20210137>

单边边坡地形的地震动力响应及其放大效应的数值分析

Numerical parametric study of seismic dynamic response and amplification effects of slope topography
地震学报. 2020, 42(3): 349–361 <https://doi.org/10.11939/jass.20190133>

近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion
地震学报. 2020, 42(4): 471–481 <https://doi.org/10.11939/jass.20190155>

韩森, 赵鸣鹤, 杜红凯, 蒋金卫. 2022. 不同时频特性近断层地震作用下的结构响应研究. 地震学报, 44(5): 911-919. doi: 10.11939/jass.20220135.

Han M, Zhao M H, Du H K, Jiang J W. 2022. Study on structural dynamic response under near fault ground motion with different time-frequency characteristics. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 911-919. doi: 10.11939/jass.20220135.

不同时频特性近断层地震作用下的结构响应研究*

韩 森 赵鸣鹤 杜红凯[†] 蒋金卫

(中国北京 100044 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心)

摘要 研究不同时频特性的地震波作用下, 抗震结构和隔震结构耦合设备的动力响应, 对五层钢框架振动台模型试验数据进行小波分析. 结果表明: 主结构动力响应与地震波时频特性直接相关; 由于主结构和隔震支座的滤波作用, 设备的动力响应受地震波时频特性影响显著, 但不具有直接相关性; 隔震结构可以使设备的频率远离主结构的频率, 从而降低设备的放大系数; 设备耦合之后主体结构加速度的变化趋势取决于不同时频特性的地震波能量分布.

关键词 振动台试验 耦合体系 动力响应 小波分析

doi: 10.11939/jass.20220135 **中图分类号:** TU352.1 **文献标识码:** A

Study on structural dynamic response under near fault ground motion with different time-frequency characteristics

Han Miao Zhao Minghe Du Hongkai[†] Jiang Jinwei

(Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The dynamic response of the anti-seismic structure and the seismic isolation structure Coupled equipment under the action of seismic waves with different time-frequency characteristics is studied, and the wavelet analysis of the test data of the five-layer steel frame shaking table model is carried out. The results show that: the dynamic response of the main structure is directly related to the time-frequency characteristics of seismic waves; due to the filtering effect of the main structure and seismic isolation bearings, the dynamic response of the equipment is significantly affected by the time-frequency characteristics of seismic waves, but there is no direct correlation; isolation can reduce the amplification coefficient of the equipment by moving the frequency of the device away from the frequency of the main structure; the variation trend of the acceleration of the main structure after coupling the equipment depends on the seismic wave energy distribution with different time-frequency characteristics.

* 基金项目 国家“十三五”重点研发计划(2019YFC1509500)和北京未来城市设计高精尖创新中心课题(UDC2019032424)共同资助.

收稿日期 2022-07-23 收到初稿, 2022-08-25 决定采用修改稿.

作者简介 韩森, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震减灾及抗震性能研究, e-mail: hanmiao@bucea.edu.cn; [†]杜红凯, 博士, 副教授, 主要从事工程结构抗震减灾及抗震性能研究, e-mail: duhongkai@bucea.edu.cn



Key words: shaking table test; coupled system; dynamic response; wavelet analysis

引言

非结构构件包括建筑非结构构件和建筑附属机电设备(中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局,2016),非结构构件与主结构共同构成耦合体系.随着经济水平的提升,人们对非结构构件和结构的安全要求不断提高,非结构构件在结构中造价占比越来越大,甚至超过主体结构的建筑成本.《建设工程抗震管理条例》规定了“位于高烈度设防地区新建学校、医院、应急指挥中心、广播电视等建筑应按照国家有关规定采取隔震减震等技术”(中华人民共和国国务院,2021).而学校的科研楼以及医院、应急指挥中心等建筑内会放置大型设备,设备耦合后将改变原结构的动力特性.王玉梅等(2013)对四川芦山地震灾后医疗设备的破坏情况进行调研,分析了采用隔震设计与未采用隔震设计的医院中非结构构件的受损情况及经济损失,结果显示:隔震设计与未进行隔震设计的结构相比,建筑成本高,但维修成本低;而未设隔震支座的医院设备损失惨重,表明隔震结构能够有效降低耦合体系动力响应.

《建筑设计抗震规范》(中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局,2016)中把非结构构件作为荷载施加在结构上,并未考虑非结构构件与主体结构的耦合作用.耦合体系相对于普通结构来说影响因素更多,结构形式更复杂,对此多位学者对耦合体系进行研究:朱丽华等(2017,2018)进行了单层厂房的设备-结构耦合体系振动台模型试验,表明质量比越大,主体结构响应越大,设备响应越小.由于耦合体系的动力响应影响因素较多,作用机理较复杂,不同学者分别建立了时域方程和频域方程进行研究(陈建兵,李杰,2001;韩森,王亮,2005).地震动具有非平稳特性,地震动的不同阶段其卓越频率不同,各个频率分量不是同时达到最大幅值(曹晖,林学鹏,2006).由于地震波特性复杂,涵盖频率广,林均岐(2001)对18种次结构进行不同频率的正弦波输入,其结果表明当正弦波频率接近结构固有频率时,耦合次结构后主结构减震效果好,次结构的“鞭梢效应”不明显,但与实际地震波作用下的动力响应差别较大.

振动台试验是获取不同结构耦合体系动力响应较为直接可靠的方法.本文拟分析不同时频特性地震波作用下的抗震结构和隔震结构与设备的耦合体系动力响应,并进行非耦合体系和耦合体系的振动台模型试验,对试验所采用的地震波进行时频分析并对试验数据进行小波变换,以研究不同时频特性的地震波对主体结构与设备的响应规律,以期提升不同时频特性地震波作用下的耦合结构体系减震效果.

1 振动台试验模型

1.1 主体结构模型

某五层钢框架结构科研楼,设防烈度Ⅷ度(0.2g),场地类别为Ⅱ类,设计地震分组第二组,标准设防丙类建筑.层高3.6m,纵横向均为6跨,跨度7.2m.科研楼顶层安装有大型设备.

试验模型取纵横各一跨,按1:4进行缩尺,梁柱均采用箱型钢,钢材均选用Q355钢,梁 L_1 和 L_2 的尺寸均为70mm×70mm×6mm,柱 Z_1 的尺寸为100mm×100mm×5mm.缩尺模型进行隔震设计,选取四个直径为150mm的铅芯橡胶支座,与四个柱子通过法兰盘相连接,隔震支座参数见表1.缩尺结构模型如图1所示.

表 1 铅芯隔震橡胶支座参数
Table 1 Parameters of lead rubber bearing

有效直径 /mm	剪切模量 /MPa	高度 /mm	橡胶层厚度 /mm	中孔直径 /mm	刚度/(kN·mm ⁻¹)			屈服力 /kN	等效阻尼比
					竖向	水平等效	屈服后		
150	0.4	102.5	28.5	15	270	0.298	0.245	1.5	11%

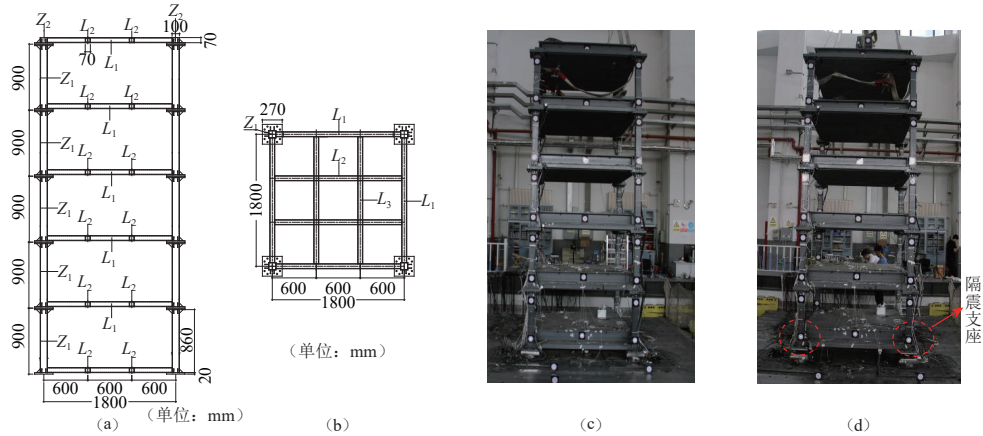


图 1 试验模型
(a) 立面尺寸; (b) 平面尺寸; (c) 抗震试验模型; (d) 隔震试验模型

Fig. 1 Test model

(a) Size of elevation ; (b) Size of plane; (c) Anti-seismic test model; (d) Seismic isolation test model

1.2 设备模型

试验模型顶部安装的设备高 0.4 m, 通过螺栓与结构顶层相连. 保持设备质量不变, 通过改变设备连接杆尺寸来改变设备水平刚度, 进而改变频率, 设备 1 和设备 2 均由四根连杆支撑, 连杆直径分别为 12 mm 和 16 mm. 设备模型如图 2 所示. 主结构质量为 13.4 t, 设备质量为 224 kg, 设备与顶层楼面的质量比为 8.8%. 设备 1 的频率为 3.86 Hz, 设备 2 的频率为 5.75 Hz. 主结构与设备组成耦合结构体系, 主结构(primary structure)模型, 主结构耦合设备 1 (primary structure coupled equipment 1)模型, 主结构耦合设备 2 (primary structure coupled equipment 2)模型.

对各试验模型进行白噪声扫频后的频率列于表 2. 频率变化率为耦合设备之后结构体系频率相对非耦合结构频率的变化百分比. 由表 2 可以看出, 耦合设备后, 结构体系的频率有不同程度降低, 耦合设备 1 对结构体系频率的降低变化率大于耦合设备 2.

1.3 数据采集装置

在楼的每层 x 向两个主梁中点和楼板中心处各布置一个加速度传感器, 如图 3 所示. 楼层加速度值取三个加速度传感器的平均值. 设备 1 和设备 2 各安装一个加速度传感器. 加速度传感器数据采集频率为 256 Hz.



图 2 设备试验模型
Fig. 2 Equipment test model

表 2 试验模型频率

Table 2 Frequency of test model			
结构类型	模型	频率/Hz	频率变化率
抗震	主结构	2.84	—
	主结构耦合设备1	2.62	8.00%
	主结构偶合设备2	2.71	4.68%
隔震	主结构	1.41	—
	主结构耦合设备1	1.25	11.61%
	主结构耦合设备2	1.41	0

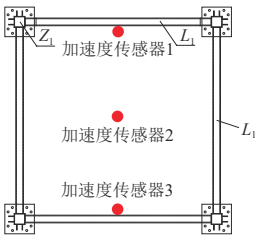


图 3 楼层加速度传感器位置

Fig. 3 Location of acceleration sensors on the floor

2 小波时频分析地震波特性

从太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center，缩写为 PEER)选取有脉冲的近断层地震波，且满足 $M_W>6.0$ ，断层距小于 20 km. 所选取的三条地震波的基本信息列于表 3. 地震波时间间隔按照 1:2 进行缩尺，峰值调幅为 0.07g，相当于Ⅷ度小震烈度. 将调幅并缩尺后的三条地震波进行小波变换，得到三条地震波的时域和频域特征，如图 4 所示，该图还反映出能量在时域和频域内的分布情况. 低频分量的地震对结构的作用较

表 3 本文选取的三条地震波基本信息

Table 3 Basic information of seismic waves selected in this study					
PEER记录序号	年份	名称	台站	M_W	断层距/km
165	1979	Imperial Valley-06	Chihuahua	6.5	7.3
185	1979	Imperial Valley-06	Holtville Post Office	6.5	5.4
766	1989	Gilroy Array #2	Gilroy Array	6.9	10.4

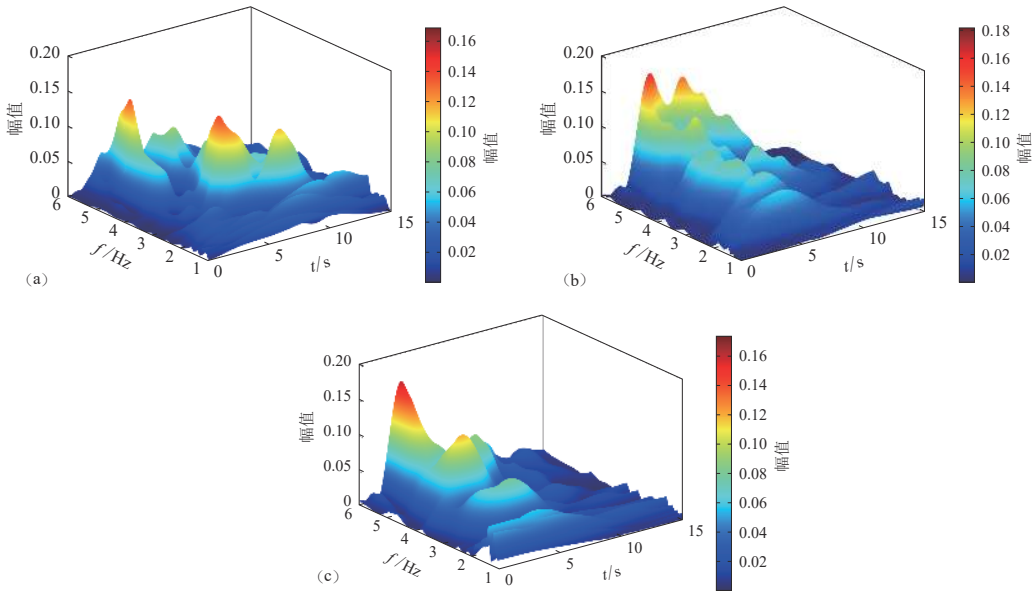


图 4 165 号(a)、185 号(b)和 766 号(c)地震波的时频图

Fig. 4 Time-frequency diagrams of seismic waves No. 165 (a), No. 185 (b) and No. 766 (c)

大, 而高频分量的作用衰减较快, 可以不予考虑(周太全等, 2003), 并结合设备和结构的频率, 仅分析地震波在 $[1, 6]$ Hz 的频域特性和时域特性. 可以看出:

165 号地震波的能量在 $[2, 6]$ Hz 的频域内分布较均匀, 有较高的能量; 在时域 $[2, 11]$ s 内分布较均匀, 持时长, 在抗震结构频率处能量高, 持时约为 4 s, 在隔震结构频率处能量低; 185 号地震波能量在 $[1, 6]$ Hz 的频域内大致呈增长趋势且分布较均匀, 在时域 $[2, 6]$ s 能量较为集中, 在抗震结构频率处有较高的能量, 持时约为 3 s, 在隔震结构频率处能量低; 766 号地震波能量在 $[1, 6]$ Hz 内分布相对不均匀, 在时域内较集中, 在抗震结构频率处有较高的能量集中, 持时约为 2 s, 在隔震结构处的总能量较高, 但时域上较为分散, 故能量虽高, 呈凸起状却不明显, 持时约为 6 s. 在抗震结构的固有频率处, 三条地震波的能量和持续时间从大到小排序顺序为 165 号、185 号和 766 号; 在隔震结构的固有频率处, 766 号地震波的能量和持时远大于 165 号和 185 号地震波. 以上表明, 三条地震波的时频特性差异显著.

3 主结构加速度及分析

将调幅并缩尺后的三条地震波输入地震波进行振动台试验, 采集得到抗震结构和隔震结构的耦合体系与非耦合体系的加速度响应. 楼面的加速度峰值如图 5 所示, 其中 0 层代表隔震层. 可以看出:

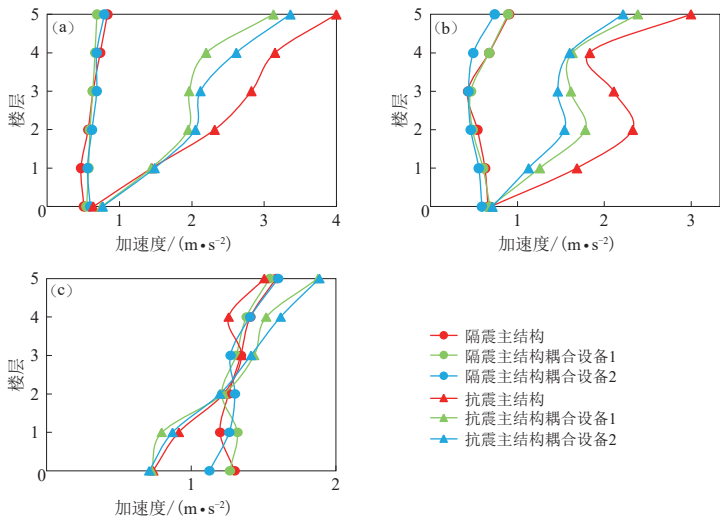


图 5 不同地震波作用下的楼层加速度

(a) 165 号地震波; (b) 185 号地震波; (c) 766 号地震波

Fig. 5 Floor acceleration under the action of different seismic waves

(a) Seismic wave No. 165; (b) Seismic wave No. 185; (c) Seismic wave No. 766

1) 在不同时频特性的地震波作用下, 隔震结构的减震效果差异明显. 在 165 号和 185 号地震波作用下, 隔震结构的层间加速度明显小于抗震结构, 表明隔震结构具有较好的减震效果; 在 766 号地震波作用下, 隔震结构的减震效果不明显, 其原因是 165 号和 185 号地震波在隔震结构固有频率附近能量较低; 在抗震结构固有频率附近能量较高, 故在 165 号和 185 号地震波作用下隔震结构加速度减震效果明显; 而 766 号地震波在隔震频率附近仍有较

高的能量和持时，故在 766 号地震波作用下结构的加速度减震效果较差。

2) 在不同时频特性的地震波作用下，抗震结构层间加速度幅值相差较大，隔震结构层间加速度幅值相差较小，这是由于是隔震结构受到隔震支座的滤波作用使得地震波对结构的直接影响减小。在 165 号地震波作用下的抗震结构层间加速度明显大于 185 号和 766 号地震波作用下的抗震结构层间加速度，其原因是 165 号地震波在抗震结构固有频率附近的能量和持时显著高于 185 号和 766 号地震波。在 766 号地震波作用下的隔震结构层间加速度大于 165 号和 185 号地震波作用下隔震结构楼层加速度，其原因是 766 号地震波在隔震结构固有频率附近的能量和持时高于 165 号和 185 号地震波。

3) 在不同时频特性的地震波作用下，设备耦合后对抗震与隔震结构的主结构的影响规律不同。设备耦合后，再 165 号和 185 号地震波作用下，抗震结构层间加速度均有明显减小，隔震结构层间加速度没有明显的变化。165 号地震波作用下，耦合频率较小的设备加速度减小更明显；185 号地震波作用下，耦合频率较大的设备加速度减小更明显。766 号地震波作用下，抗震结构设备耦合后的层间加速度出现增大情况，隔震结构层间加速度变化不明显，其原因是耦合了设备之后，改变了原结构的频率、阻尼等特性，在不同时频特性的地震波作用下动力响应的规律发生了变化。当耦合体系频率附近的地震波能量高于原结构频率附近的地震波能量时，耦合作用可能导致原结构响应增大；当耦合体系频率附近的地震波能量低于原结构频率附近的地震波能量时，耦合作用可能导致原结构响应减小。

由以上分析可知，抗震结构和隔震结构的主结构加速度、隔震后减震效果以及耦合作用在不同时频特性地震波作用下的差异较大，这均与地震波时频特性直接相关。

4 设备加速度及分析

4.1 设备加速度

抗震结构(设备 1 由于由于加速度计问题无实测记录)和隔震结构中设备加速度响应列于表 4，可以看出：

表 4 设备加速度峰值

Table 4 Peak acceleration of equipment

PEER 地震波 编号	设备1加速度 峰值/(m·s ⁻²)	设备2加速度 峰值/(m·s ⁻²)	
	隔震结构	抗震结构	隔震结构
165	1.42	5.66	1.12
185	1.62	4.43	1.29
766	2.46	2.94	2.36

1) 隔震结构中设备 1 的加速度峰值均大于设备 2。同时分析图 4 地震波时频特性可知，185 号和 766 号两条地震波在设备 2 的固有频率处的能量显著大于设备 1。隔震结构设备 1 的加速度峰值均大于设备 2，说明主结构和隔震支座起到了一定的滤波作用，设备的加速度响应与地震波的时频特

性不具有直接相关性。

2) 隔震结构中设备 2 的加速度峰值小于抗震结构中设备 2 的加速度峰值，隔震支座对设备 2 有较好的减震效果。在 766 号地震波作用下，设备 2 的隔震效果不明显，其原因是在 766 号地震波作用下，主结构的隔震效果较差，故隔震后设备的激励与抗震时设备的激励接近，未像其它地震波一样显著降低设备激励。

以上分析可知，由于主结构和隔震支座的滤波作用，抗震结构和隔震结构中的设备加速度响应以及隔震后的加速度减震效果均不与地震波的时频特性直接相关。

4.2 通过小波分析设备动力响应

通过小波变换和小波逆变换对特定频段的加速度信号进行提取和重构, 将地震波作用下的整体响应, 细化到关键频段的响应, 以研究不同时频特性的地震波对设备不同频段的影响.

耦合结构体系动力响应特性由设备频率、主结构频率和地震波频率共同决定, 故耦合体系具有多频率特性. 将包含抗震主结构固有频率(2.88 Hz)且带宽为 1 Hz 的加速度称为抗震结构第一频段加速度, 将包含设备 1 固有频率(3.86 Hz)且带宽为 1 Hz 的加速度称为抗震结构第二频段, 将包含设备 2 固有频率(5.75 Hz)

且带宽为 1 Hz 的加速度称为抗震结构第三频段, 振动台试验直接测得的加速度称为全频段加速度. 隔震结构频段划分依据与抗震结构相同, 具体频段划分列于表 5.

表 5 重构信号频段

Table 5 Reconfiguring the signal frequency band			
频段名称	第一频段/Hz	第二频段/Hz	第三频段/Hz
抗震结构	[2.0, 3.0]	[3.6, 4.6]	[5.5, 6.5]
隔震结构	[1.0, 2.0]	[3.5, 4.5]	[5.5, 6.5]

在不同时频特性的地震波作用下, 顶层楼面加速度响应不一致, 即设备的激励不一致. 为分析不同时频特性的地震波对设备动力响应的影响, 定义设备加速度放大系数为设备的加速度峰值与顶层楼面的加速度峰值的比值. 通过小波变换和逆变换得到特征频段的设备加速度峰值和加速度放大系数, 如表 6 和表 7 所示.

表 6 抗震结构中设备特征频段的设备加速度峰值及放大系数

Table 6 Acceleration peaks and its amplification of the devices in seismic-resistant structures within several characteristic frequency bands equipment						
PEER 地震波编号	设备2加速度峰值/(m·s ⁻²)			设备2加速度放大系数		
	第一频段	第三频段	全频段	第一频段	第三频段	全频段
165	2.86	1.00	5.66	1.23	7.47	1.68
185	1.64	1.46	4.43	1.22	6.17	2.00
766	1.86	1.31	2.94	1.23	6.59	1.56

表 7 隔震结构中设备特征频段的设备加速度峰值及放大系数

Table 7 Equipment acceleration in the characteristic frequency band of equipment in a seismically isolated structures												
PEER地震 波编号	设备1加速度峰值/(m·s ⁻²)			设备1加速度放大系数			设备2加速度峰值/(m·s ⁻²)			设备2加速度放大系数		
	第一频段	第二频段	全频段	第一频段	第二频段	全频段	第一频段	第三频段	全频段	第一频段	第三频段	全频段
165	0.73	0.9	1.42	1.12	8.76	2.06	0.67	0.46	1.12	1.04	2.84	1.41
185	0.43	0.95	1.62	1.19	11.2	1.82	0.36	0.78	1.29	1.06	3.21	1.75
766	1.4	1.26	2.46	1.12	13.11	1.59	1.18	0.27	2.36	1.03	3.12	1.47

设备 2 与抗震结构的频率比为 2.02, 设备 1 和设备 2 与隔震结构的频率比为 2.74 和 4.08, 频率比逐渐增大. 第一频段和全频段下加速度放大系数与频率比的关系如图 6 所示.

通过分析表 6、表 7 和图 6 可知:

1) 在第一频段, 设备频率越接近主结构, 设备的加速度放大系数越大, 曲线越陡, 且加速度放大系数在不同地震波作用下的差异越显著, 受地震波时频特性影响程度较大; 设备频率越远离主结构, 设备的加速度放大系数越小, 曲线越平缓, 不同地震波作用下设备的加速度放大系数接近, 受地震波时频特性影响程度较小(图 6).

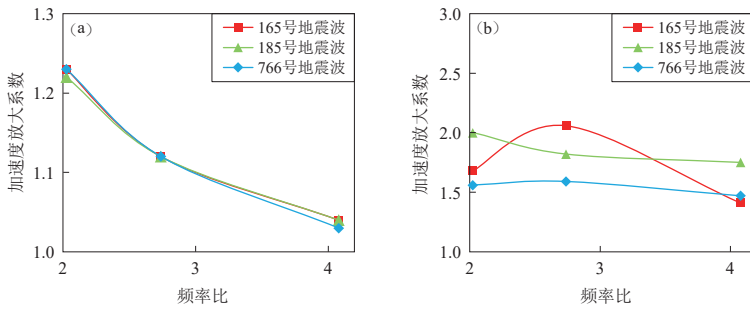


图 6 不同地震波作用下第一频段(a)和全频段(b)的设备加速度放大系数

Fig. 6 Amplification factor of equipment at main structure band (a) and full band (b) under the action of different seismic waves

2) 第二、三频段设备的加速度放大系数规律不明显,不同地震波作用下同一设备的加速度放大系数相差较大,故在二、三频段受地震波时频特性的影响显著(表 6 和表 7)。

3) 由于第二、三频段受地震波时频特性影响显著,导致全频段设备加速度放大系数受地震波时频特性影响显著,但不具有直接相关性(图 6b 和表 6、表 7)。

4) 由表 6 和表 7 可知,隔震后设备 2 的加速度放大系数有一定程度的降低,表明隔震可以使设备的频率远离主结构的频率,使设备的加速度放大系数减小。

由以上分析可知:不同时频特性的地震波作用下,设备的加速度放大系数差异较大,但与地震波的时频特性不具有直接相关性,这是由于主体结构的滤波作用影响所致。此外,隔震结构可以降低设备的加速度放大系数。

5 讨论与结论

耦合体系动力响应的影响因素较多,通过振动台试验得到设备与抗震结构和隔震结构在三条不同时频特性的地震波作用下耦合体系的加速度响应,进而采用小波分析方法对试验得到的加速度响应进行提取和重构,得到以下结论:

1) 主结构动力响应与地震波时频特性直接相关。抗震结构和隔震结构的主结构加速度、隔震结构减震效果在不同时频特性的地震波作用下差异较大。

2) 设备的加速度放大系数在不同时频特性的地震波作用下差异较大,但由于主体结构 and 隔震支座的滤波作用,设备动力响应与地震波时频特性不具有直接相关性。隔震结构可以使设备的频率远离主结构的频率,以降低设备的加速度放大系数。

3) 主结构与设备耦合后,结构固有频率有所降低。设备耦合之后主体结构加速度的变化趋势取决于地震波的时频特性。

参 考 文 献

- 曹晖, 林学鹏. 2006. 地震动非平稳特性对结构非线性响应影响的分析[J]. 工程力学, 23(12): 30-35.
- Cao H, Lin X P. 2006. The effect of nonstationary characteristic of earthquake ground motion on the structural nonlinear responses[J]. Engineering Mechanics, 23(12): 30-35 (in Chinese).
- 陈建兵, 李杰. 2001. 结构-设备体系动力相互作用研究[J]. 地震工程与工程振动, 21(3): 70-74.
- Chen J B, Li J. 2001. Research on dynamic interaction between structure and equipment[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 21(3): 70-74 (in Chinese).

- 韩森, 王亮. 2005. 考虑耦联影响的二次结构体系减震分析[J]. *世界地震工程*, **21**(1): 42–46.
- Han M, Wang L. 2005. Seismic analysis of secondary systems considering coupled effect[J]. *World Earthquake Engineering*, **21**(1): 42–46 (in Chinese).
- 林均岐. 2001. 二级结构地震反应的实验研究[J]. *地震工程与工程振动*, **21**(3): 75–78.
- Lin J Q. 2001. Experimental study on seismic response of secondary structure[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **21**(3): 75–78 (in Chinese).
- 王玉梅, 熊立红, 许卫晓. 2013. 芦山 7.0 级地震医疗建筑震害与启示[J]. *地震工程与工程振动*, **33**(4): 44–53.
- Wang Y M, Xiong L H, Xu W X. 2013. Seismic damage and damage enlightenment of medical buildings in Lushan $M_s 7.0$ earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **33**(4): 44–53 (in Chinese).
- 中华人民共和国国务院. 2021. 建设工程抗震管理条例[J]. 中华人民共和国国务院公报, (23): 13–19.
- The State Council of the People's Republic of China. 2021. Regulations on anti-seismic management of construction projects[J]. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, (23): 13–19 (in Chinese).
- 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 2016. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2004. *GB50011—2001 Code for Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese).
- 周太全, 李兆霞, 贾军波, 贾志斌. 2003. 基础隔震结构在地震作用下动力响应小波分析[J]. *工业建筑*, **33**(6): 21–23.
- Zhou T Q, Li Z X, Jia J B, Jia Z B. 2003. Dynamic response analysis of isolated seismic foundation structure under earthquake motion using wavelet transformation[J]. *Industrial Construction*, **33**(6): 21–23 (in Chinese).
- 朱丽华, 李穹, 张现宾, 马颖飞. 2017. 地震作用下结构-设备耦合体系动力相互作用研究[J]. *世界地震工程*, **33**(2): 64–70.
- Zhu L H, Li Q, Zhang X B, Ma Y F. 2017. Study on dynamic interaction of structure-equipment coupled system under earthquake action[J]. *World Earthquake Engineering*, **33**(2): 64–70 (in Chinese).
- 朱丽华, 周豪毅, 张现宾, 高飞凡. 2018. 结构-设备耦合体系地震响应振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, **51**(增刊 2): 116–123.
- Zhu L H, Zhou H Y, Zhang X B, Gao F F. 2018. Shaking table test on seismic response of structure-equipment coupled system[J]. *China Civil Engineering Journal*, **51**(S2): 116–123 (in Chinese).