

弹性滑板支座不同摩擦系数对楼层反应谱的影响

戴纳新¹,王东梅^{1†},谭平²,周福霖^{2,3},申梦岭⁴

[1. 南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001;

2. 广东省广州市地震工程与应用技术重点实验室(广州大学),广东 广州 510405;

3. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;

4. 核工业工程研究设计有限公司,北京 101300]

摘要:采用课题组建立的楼层反应谱 Benchmark 模型,研究弹性滑板支座不同摩擦系数对楼层反应谱的影响.使用 ETABS 软件建立隔震结构有限元模型,在底层柱底和基础之间布置弹性滑板支座,为了使楼层反应谱具有实用性和代表性,输入 FEMA P695 中推荐的 22 条远场地震动,分别对 4 个摩擦系数的基础隔震结构进行非线性时程分析,研究弹性滑板支座摩擦系数对楼层反应谱的影响,并与铅芯橡胶支座隔震结构楼层反应谱进行比较.结果表明:摩擦系数影响楼层反应谱的谱值,但不改变楼层反应谱峰值出现的周期,不影响楼层反应谱的频谱特征;在周期 0~6 s 内,文中 4 种摩擦系数的弹性滑板支座结构的楼层反应谱谱值均小于铅芯橡胶支座的谱值,说明该结构弹性滑板支座的隔震性能优于铅芯橡胶支座.

关键词:摩擦系数;弹性滑板支座;地震动;楼层反应谱;有限元分析

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

Effect of Different Friction Coefficients of Elastic Slide Bearings on Floor Response Spectra

DAI Naxin¹, WANG Dongmei^{1†}, TAN Ping², ZHOU Fulin^{2,3}, SHEN Mengling⁴

[1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Earthquake Engineering & Applied Technique (Guangzhou University), Guangzhou 510405, China;

3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

4. Nuclear Industry Engineering Research & Design Co., Ltd., Beijing 101300, China]

Abstract: The Benchmark model of the floor response spectrum established by our study group was used to study the effect of different friction coefficients of the elastic slide bearing on the floor response spectrum. ETABS software was used to establish the finite element model of the seismic isolation structure, and the elastic slide bearing was arranged between the bottom of the ground floor column and the foundation. To make the floor response spectrum practical and representative, the 22 far-field vibrations recommended in ATC-63 were inputted to carry out the nonlinear time-distance analysis for the four friction coefficients of the base seismic isolation structure,

* 收稿日期:2023-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51468010, 52378293), National Natural Science Foundation of China(51468010, 52378293)

作者简介:戴纳新(1969—),男,湖南长沙人,南华大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: 2726795717@qq.com

respectively, and to study the effect of the friction coefficients of the elastic slide bearing on the floor response spectrum, which was compared with that of the friction coefficient of lead core rubber bearing seismic isolation. The results show that the friction coefficient affects the spectral value of the floor response spectrum but does not change the period of the peak value of the floor response spectrum and does not affect the spectral characteristics of the floor response spectrum; in the period of 0~6 s, the spectral value of the floor response spectrum of the four friction coefficients of elastic slide bearing structure in the paper is less than that of the lead core rubber bearing, which indicates that the seismic isolation performance of this structure of elastic slide bearing is better than that of the lead core rubber bearing.

Key words: friction coefficient; elastic slide bearing; ground motion; floor response spectrum; finite element analysis

基础隔震技术是在上部结构和下部支撑或基础之间布置隔震装置,来改变结构的振动周期,使其远离地震地面运动对结构的主要激励周期,从而降低上部结构的地震反应^[1]. 目前建筑常用的隔震装置主要有摩擦隔震支座和橡胶系隔震支座^[2]. 摩擦隔震支座包括弹性滑板支座(ESB)和摩擦摆支座(FPS),弹性滑板支座通过滑移材料在滑动面上水平滑动来隔离地震,当滑移面开始滑动时,支座的水平刚度为0,减少向上传递的地震能量. 与传统的橡胶隔震支座相比,其具有较高竖向承载能力、水平变形能力,摩擦系数小和长期性能稳定等特点.

单自由度体系质点的最大响应与地震带来的体系自振周期之间的关系曲线被称为楼层反应谱^[3]. 楼层反应谱是建筑结构的非结构构件抗震设计的基本依据,因此研究弹性滑板支座不同摩擦系数对隔震结构楼层反应谱的影响可以为实际工程中弹性滑板支座混合隔震系统的设计、施工和研究提供一定的参考价值. 曾奔等^[4]通过功率谱密度函数法得到基础隔震结构的楼层反应谱,与目标反应谱一致. 黄海荣等^[5]使用 ETABS 软件对铅芯橡胶支座基础隔震结构进行动力时程分析,提出隔震结构设计反应谱和位移反应谱的计算公式. Isaković 等^[6]分析了受多遇地震影响的高阻尼橡胶支座隔震结构的楼层反应谱,并给出影响楼层谱的主要参数. 韩森等^[7]对5层钢框架叠层天然橡胶隔震结构进行抗震和层间隔震振动台试验,并对层间隔震结构的楼层反应谱进行研究. 王亚等^[8]对某实际采用橡胶隔震支座的博物馆进行时程分析,通过 MATLAB 计算得到准确的楼层响应和楼层反应谱. Berto 等^[9]广泛讨论了通过

对钢筋混凝土结构进行线性和非线性数值模拟获得的楼层反应谱参数化,并讨论了楼层加速度峰值和楼层速度峰值在整个建筑物高度上的分布情况. 党育等^[10]对隔震橡胶支座结构进行分析,利用得到的双峰值楼面设计反应谱统计拟合出各特征参数的计算公式.

综上,目前有关基础隔震结构楼层反应谱的研究大多数采用橡胶隔震支座,关于弹性滑板支座隔震结构的楼层反应谱研究较少. 由于滑板支座的滑动摩擦系数影响因素较多,例如材料副配对性质、滑动速度、温度状况、摩擦表面接触几何特性和表面层物理性质等^[11],这使得实际工程中难以确定滑移支座的摩擦系数,因此本文选取了4个摩擦系数分别为0.01、0.05、0.10和0.20,来分析摩擦系数对楼层反应谱的影响. 本文使用有限元软件 ETABS 建立弹性滑板支座隔震结构的精细化模型,选取22条远场地震动进行时程分析,研究弹性滑板支座的摩擦系数对楼层反应谱的影响,为后续的隔震结构抗震设计提供参考.

本文分别对6、9、12层的3种隔震结构进行时程分析^[12],探究楼层反应谱曲线的规律和变化趋势,结果发现:除楼层反应谱对应的数值有所不同外,其规律和变化趋势基本一致,反应谱峰值的频率也一致,因此文中仅以9层结构为例阐明研究过程和结论.

1 工程概况

1.1 Benchmark 模型与工程实例

振动控制和隔震领域通常建立 Benchmark 模型

来研究控制器(隔震器)对地震响应的影响. 为了研究黏滞液体阻尼器、天然橡胶隔震支座和摩擦系数对楼层反应谱的影响,本课题组也力图建立一个楼层反应谱的 Benchmark 模型,为楼层反应谱的研究提供一个数据平台. 靳涛等^[13]建立了 6 层结构模型来研究黏滞阻尼器的不同布置方案对楼层反应谱的影响.

文中的 Benchmark 模型是某地区 9 层医院建筑. 该建筑为钢筋混凝土框架结构,地上 9 层,无地下室,结构总高度为 46.5 m,各楼层高度如表 1 所示. X 方向长度为 64 m,共 8 跨,每一跨的长度均为 8 m; Y 方向宽度为 33 m,共 4 跨,第一跨的长度为 9 m,其余跨的长度均为 8 m. 该建筑结构的梁和柱均为矩形截面:首层柱截面为 800 mm×800 mm,2~9 层柱截面为 700 mm×700 mm;梁截面为 300 mm×600 mm (宽×高);楼板厚度为 120 mm. 在柱底和基础之间布置弹性滑板支座形成隔震层,高度为 1.5 m. 结构阻尼比为 0.05. 使用 ETABS 软件建立的有限元模型如图 1 所示.

表 1 建筑结构的楼层高度

Tab.1 The floor height of the building structure					
楼层	隔震层	1 层	2~5 层	6~8 层	9 层
层高/m	1.5	5.5	4.5	5.5	5.0

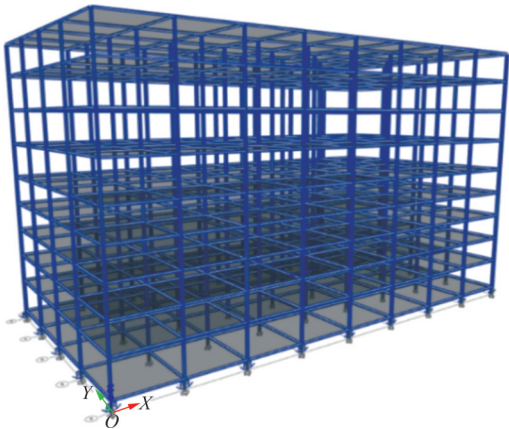


图 1 弹性滑板支座结构模型

Fig.1 Structural model of elastic slide bearing

1.2 弹性滑板支座模型

本文只探究弹性滑板支座摩擦系数对楼层反应谱的影响,因此将弹性滑板支座模型的滑移元件假定为刚度无穷大的刚体. 弹性滑板支座模型如图 2 所示,主要包括相对设置的上下支座板、刚性滑移元件、复位橡胶组、覆盖在下支座板顶面的耐磨板等,

可通过改变耐磨板的材料或者粗糙程度来实现不同摩擦系数的弹性滑板隔震支座.

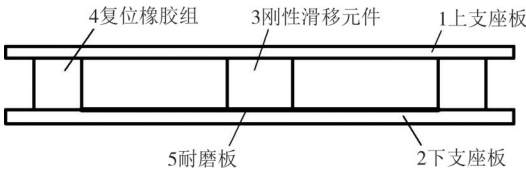


图 2 弹性滑板支座模型图

Fig.2 Model diagram of elastic slipde bearing

1.3 弹性滑板支座参数设置

弹性滑板支座的滞回模型如图 3 所示,在 ETABS 软件中滑移支座滑移元件用摩擦摆隔震器 (Friction Isolation) 连接单元模拟,复位橡胶组用橡胶隔震器 (Rubber Isolation) 连接单元模拟. 本文中的弹性滑板支座的滑动面为水平面,半径应该是无穷大的,在 ETABS 软件中将其半径定义为 0,则软件会自动默认此时的滑动面为水平面^[14]. 在软件中需要设置的关键参数有: K_i 为支座起滑前的初始刚度,在软件中输入一个相当大的数值表示; D_y 为屈服位移,文中取 0.5 mm; K_{eff} 为弹性滑板支座的等效刚度,支座本质特征是非线性的,弹性滑板支座中滑移元件的分析模型为等效线性化模型,可用等效线性化的方法来计算支座的等效刚度; D_d 为支座的极限位移或设计位移^[15]. 模型假定支座在运动的过程中竖向压力值不变^[14].

$$K_i = \frac{\mu W}{D_y}$$

(1)

$$K_{eff} = \frac{F}{D_d} = \frac{\mu W}{D_d}$$

(2)

式中: μ 为滑移元件的动摩擦系数; W 为支座承受的竖向荷载, kN.

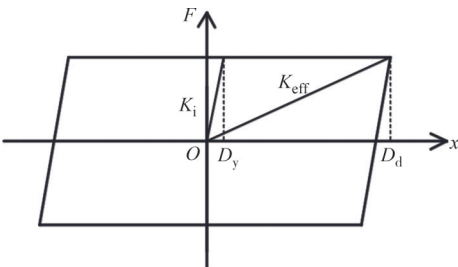


图 3 弹性滑板支座滞回模型图

Fig.3 Hysteresis model diagram of elastic slipde bearing

该结构将弹性滑板支座布置在底层柱底和基础顶部,由于基础隔震结构不同柱受力不同,承受的竖向荷载不同,因此会得到不同的支座参数. 由《建筑

结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[16]可知,住院病房楼面均布活荷载标准值取 2.0 kN/m²,楼面恒荷载标准值取 3.0 kN/m². 在 ETABS 软件中定义重力荷载标准组合,即 1 倍的恒荷载和 0.5 倍的活荷载;定义恒荷载的自重系数为 1.0,其他荷载自重系数为 0,将结构的自重以恒载的模式施加到结构上.运行分析可得出各支座承受的来自结构的竖向压力,通过式(1)计算出支座的初始刚度,通过软件 ETABS 计算出滑

移支座罕遇地震下的剪力和位移,通过式(2)计算出水平等效刚度.重复以上步骤,在计算过程中需要不断迭代直到支座位移满足收敛条件^[17],最终计算得到弹性滑板支座的水平等效刚度如表 2 所示,表明水平等效刚度随着摩擦系数增大而增大.弹性滑板支座布置如图 4 所示,支座中橡胶组为天然橡胶支座 LNR900,竖向刚度为 3 900 kN/mm,水平等效刚度为 1.69 kN/mm.

表 2 弹性滑板支座最终等效水平刚度

Tab.2 Final equivalent horizontal stiffness of elastic slide bearing

支座 编号	竖向 压力/kN	摩擦 系数 μ	初始刚度/ (kN·m ⁻¹)	初步等效刚度/ (kN·m ⁻¹)	等效刚度/ (kN·m ⁻¹)	支座 编号	竖向 压力/kN	摩擦 系数 μ	初始刚度/ (kN·m ⁻¹)	初步等效 刚度/(kN·m ⁻¹)	等效刚度/ (kN·m ⁻¹)
1、9	2 261	0.01	44 320	55	57	22、24	5 857	0.01	117 140	146	150
		0.05	221 600	277	297			0.05	585 700	732	785
		0.10	443 200	554	591			0.10	1 171 400	1 464	1 562
		0.20	886 400	1 108	1 241			0.20	2 342 800	2 928	3 281
2、8	3 470	0.01	69 400	87	89	23	5 857	0.01	117 140	146	150
		0.05	347 000	434	465			0.05	585 700	732	785
		0.10	694 000	868	925			0.10	1 171 400	1 464	1 562
		0.20	1 388 000	1 736	1 944			0.20	2 342 800	2 928	3 281
3、7	3 496	0.01	69 920	87	90	28、36	3 646	0.01	72 920	91	93
		0.05	349 600	437	469			0.05	364 600	456	489
		0.10	699 200	874	932			0.10	729 200	912	972
		0.20	1 398 400	1 748	1 959			0.20	1 458 400	1 824	2 043
4、6	3 497	0.01	69 940	87	90	29、35	6 073	0.01	121 460	152	156
		0.05	349 700	437	469			0.05	607 300	759	814
		0.10	699 400	874	932			0.10	1 214 600	1 518	1 619
		0.20	1 398 800	1 748	1 959			0.20	2 429 200	3 036	3 402
5	3 496	0.01	69 920	87	90	30、34	6 123	0.01	122 460	153	157
		0.05	349 600	437	469			0.05	612 300	766	821
		0.10	699 200	874	932			0.10	1 224 600	1 531	1 633
		0.20	1 398 400	1 748	1 959			0.20	2 449 200	3 062	3 430
10、18	3 473	0.01	69 460	87	89	31、33	6 123	0.01	122 460	153	157
		0.05	347 300	434	466			0.05	612 300	766	821
		0.10	694 600	868	926			0.10	1 224 600	1 531	1 633
		0.20	1 389 200	1 736	1 946			0.20	2 449 200	3 062	3 430
11、17	5 761	0.01	115 220	144	148	32	6 123	0.01	122 460	153	157
		0.05	576 100	720	772			0.05	612 300	766	821
		0.10	1 152 200	1 440	1 536			0.10	1 224 600	1 531	1 633
		0.20	2 304 400	2 880	3 227			0.20	2 449 200	3 062	3 430
12、16	5 807	0.01	116 140	145	149	37、45	2 380	0.01	47 600	60	61
		0.05	580 700	726	778			0.05	238 000	298	319
		0.10	1 161 400	1 452	1 549			0.10	476 000	595	635
		0.20	2 322 800	2 904	3 253			0.20	952 000	1 190	1 333
13、15	5 808	0.01	116 160	145	149	38、44	3 760	0.01	75 200	94	96
		0.05	580 800	726	778			0.05	376 000	470	540
		0.10	1 161 600	1 452	1 549			0.10	752 000	940	1 003
		0.20	2 323 200	2 904	3 254			0.20	1 504 000	1 880	2 106

续表

14	5 808	0.01	116 160	145	149	39、43	3 789	0.01	75 780	95	97
		0.05	580 800	726	778			0.05	378 900	474	508
		0.10	1 161 600	1 452	1 549			0.10	757 800	947	1 010
		0.20	2 323 200	2 904	3 254			0.20	1 515 600	1 894	2 123
19、27	3 500	0.01	70 000	88	90	40、42	3 790	0.01	75 800	95	97
		0.05	350 000	438	469			0.05	379 000	474	508
		0.10	700 000	875	933			0.10	758 000	948	1 011
		0.20	1 400 000	1 750	1 961			0.20	1 516 000	1 896	2 123
20、26	5 809	0.01	116 180	145	149	41	3 790	0.01	75 800	95	97
		0.05	580 900	726	779			0.05	379 000	474	508
		0.10	1 161 800	1 452	1 549			0.10	758 000	948	1 011
		0.20	2 323 600	2 904	3 254			0.20	1 516 000	1 896	2 123
21、25	5 856	0.01	117 120	146	150			0.01			
		0.05	585 600	732	785			0.05			
		0.10	1 171 200	1 464	1 562			0.10			
		0.20	2 342 400	2 928	3 281			0.20			

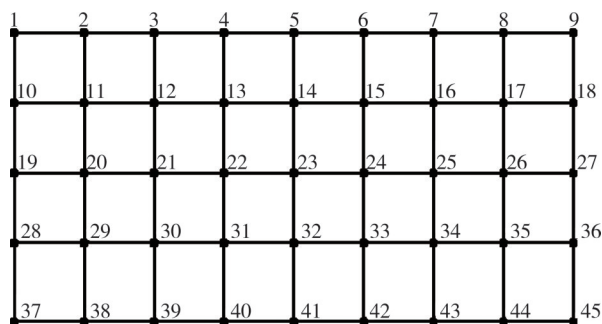


图4 弹性滑板支座平面布置图

Fig.4 Floor plan of the elastic slide bearing

1.4 铅芯橡胶支座参数设置

该医院建筑为乙类建筑结构,根据《建筑抗震设计规范(2016年版)》(GB 50011—2010)^[18]规定:乙类建筑结构的橡胶支座在重力荷载代表值下的竖向压应力不应超过 12 MPa. 同样需要根据各支座的竖向压力和容许应力值,按照式(3)和式(4)计算得出橡胶支座的最小直径,然后进一步选取合适的铅芯橡胶隔震支座.

$$A = \frac{F}{\sigma} \quad (3)$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (4)$$

式中: A 为隔震支座的面积, mm^2 ; D 为支座的直径, mm ; σ 为支座所能承受的最大压应力, MPa .

图 5 为铅芯橡胶支座布置图,在建筑结构外框架的柱底和基础之间布置 LRB700 的铅芯橡胶支座共 24 个,内部(框线内部)的柱底和基础之间布置 LRB900 的铅芯橡胶支座共 21 个,各支座铅芯橡胶支

座信息及橡胶支座参数分别如表 3 和表 4 所示. 在有限元 ETABS 软件中铅芯橡胶支座用橡胶隔震器连接单元模拟,同时并联一个 GAP 单元,以实现支座拉压刚度为 $1:10^{[19]}$.

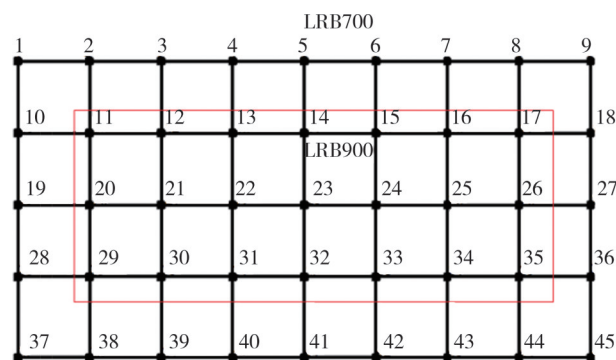


图5 铅芯橡胶支座平面布置图

Fig.5 Floor plan of the lead core rubber bearing

2 地震波的选择

本地区抗震设防烈度为 8 度($0.2g$),建筑场地类别为 II 类,设计地震分组为第 3 组,设计特征周期 $T_g = 0.45 \text{ s}$. 地震动的频率含量和相关的振幅对隔震结构性能有重要影响^[20],根据相关规范和标准确定分析所使用的加速度反应谱,选取 *Quantification of building seismic performance factors* (FEMA P695)^[21]中推荐的 22 组实际远场地震动. 这些地震动具有相似的特征,如断层破裂距离小于 10 km,震级大于或等于 6.5,走滑或反向机制,场地条件为软岩或硬土^[22]. 同

表 3 各支座铅芯橡胶支座信息表

Tab.3 Lead core rubber bearing information table for each bearing

支座编号	竖向压力/kN	支座类型	支座直径/mm	压应力/MPa	支座编号	竖向压力/kN	支座类型	支座直径/mm	压应力/MPa
1、9	2 261	LRB700	700	5.76	22、24	5 857	LRB900	900	9.21
2、8	3 470	LRB700	700	9.02	23	5 857	LRB900	900	9.21
3、7	3 496	LRB700	700	9.09	28、36	3 646	LRB700	700	9.48
4、6	3 497	LRB700	700	9.09	29、35	6 073	LRB900	900	9.55
5	3 496	LRB700	700	9.09	30、34	6 123	LRB900	900	9.63
10、18	3 473	LRB700	700	9.03	31、33	6 123	LRB900	900	9.63
11、17	5 761	LRB900	900	9.06	32	6 123	LRB900	900	9.63
12、16	5 807	LRB900	900	9.13	37、45	2 380	LRB700	700	6.19
13、15	5 808	LRB900	900	9.13	38、44	3 760	LRB700	700	9.78
14	5 808	LRB900	900	9.13	39、43	3 789	LRB700	700	9.85
19、27	3 500	LRB700	700	9.10	40、42	3 790	LRB700	700	9.85
20、26	5 809	LRB900	900	9.13	41	3 790	LRB700	700	9.85
21、25	5 856	LRB900	900	9.21					

表 4 铅芯橡胶支座参数

Tab.4 Parameters of lead core rubber bearing

支座型号	竖向刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服后刚度/ (kN·mm ⁻¹)	屈服力/kN	等效刚度/ (kN·mm ⁻¹)
LRB700	2 877	1.082	123	1.962
LRB900	4 807	1.532	212	2.841

时还根据规范反应谱在 Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER)中选取了 10 条天然地震动. 通过 ETABS 软件分别分析计算这两种地震动下隔震结构的楼层反应谱, 会发现这两种地震动下楼层反应谱的规律和趋势基本一致. 由于 FEMA P695 中推荐的 22 组远场地震动更具有普遍性, 因此本文仅展示了 22 组远场地震动下隔震结构的相关数据以及楼层反应谱, 具体地震动信息如表 5 所示, 采用 SeismoMatch 软件对地震动通过调整波频幅度、加速

频率的方式匹配目标的响应谱, 内置专业的小波算法, 使得各地震动加速度反应谱与规范的目标加速度反应谱相吻合. 拟合后的加速度反应谱如图 6 所示.

3 楼层反应谱计算方法

楼层反应谱的计算方法主要有两种, 一种是直接谱对谱法^[23], 直接输入地震动的反应谱生成楼层反应谱; 另一种是时程分析法, 将地震动加速度时程作用于单自由度结构, 再将得到的某一楼层的加速度响应时程作为单自由度体系的激励, 即可得到楼层反应谱^[7].

使用时程分析法得出的楼层加速度反应谱和位移反应谱计算公式为:

表 5 22 组远场地震动具体信息

Tab.5 22 sets of far-field vibration specific information

编号	地震名称	台站	PGA/g	编号	地震名称	台站	PGA/g
1	San_Fernando	LA-Hollywood_Stor_FF	0.21	2	Friuli-Italy-01	Tolmezzo	0.351
3	Imperial_Valley-06	Delta	0.238	4	Loma_Prieta	Capitola	0.529
5	Superstition_Hills-02	El_Centro_Imp._Co._Cent	0.358	6	Kobe-Japan	Shin-Osaka	0.243
7	Imperial_Valley-06	El_Centro_Array_#11	0.529	8	Loma_Prieta	Gilroy_Array_#3	0.555
9	Cape_Mendocino	Rio_Dell_Overpass-FF	0.385	10	Landers	Coolwater	0.284
11	Northridge-01	Beverly_Hills-14145_Mulhol	0.416	12	Landers	Yermo_Fire_Station	0.245
13	Northridge-01	Canyon_Country-W_Lost_Cany	0.41	14	Kobe-Japan	Nishi-Akashi	0.509
15	Superstition_Hills-02	Poe_Road_(temp)	0.446	16	Kocaeli-Turkey	Arcelik	0.219
17	Kocaeli-Turkey	Duzce	0.312	18	Chi-Chi-Taiwan	CHY101	0.353
19	Chi-Chi_Taiwan	TCU045	0.473	20	Duzce-Turkey	Bolu	0.728
21	Manjil_Iran	Abbar	0.515	22	Hector_Mine	Hector	0.266

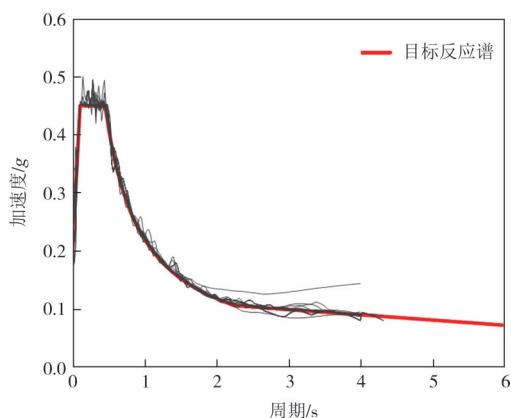


图6 设防烈度下拟合地震动加速度反应谱

Fig.6 Fitting the acceleration response spectrum of ground motion under fortification intensity

$$S_a(T) = \left| \frac{2\pi}{T} \int_0^t \ddot{x}_f(\tau) e^{-\xi \frac{2\pi}{T}(t-\tau)} \sin \frac{2\pi}{T}(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \quad (5)$$

$$S_d(T) = \left| \frac{T}{2\pi} \int_0^t \ddot{x}_f(\tau) e^{-\xi \frac{2\pi}{T}(t-\tau)} \sin \frac{2\pi}{T}(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \quad (6)$$

$$S_v(T) = \left| \int_0^t \ddot{x}_f(\tau) e^{-\xi \frac{2\pi}{T}(t-\tau)} \sin \frac{2\pi}{T}(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \quad (7)$$

式中: S_a 为次结构绝对加速度, mm/s^2 ; T 为周期, s ; $\ddot{x}_f$ 为楼层加速度, mm/s^2 ; ξ 为次结构阻尼比; t 为楼层加速度响应时间, s ; S_d 为次结构位移, mm ; S_v 为次结构相对速度, mm/s .

本文是在软件 ETABS 中分别输入 22 条远场地震动的加速度时程曲线, 采用快速非线性时程分析法 (FNA) 模拟得到具体楼层的绝对加速度时程响应^[24], 再使用 MATLAB 程序计算转换得到每层的楼层反应谱. 对于输入的地震动, 给定所求楼层上的某点就可以求得对应于不同摩擦系数的楼层反应谱. 由于本文的结构模型假定楼板平面内刚度无穷大, 因此每个楼层内的任一点的楼层反应谱是相同的. 对弹性滑板支座隔震结构输入 22 条远场地震动进行非线性时程分析, 得到各个楼层的楼层反应谱, 并对 22 条地震动下的楼层反应谱值统计分析, 绘制出隔震结构各楼层的包络反应谱和均值反应谱.

4 隔震结构楼层反应谱分析

4.1 弹性滑板支座不同摩擦系数的楼层反应谱

本地区设防烈度为 8 度, 使用有限元软件 ETABS 进行非线性时程分析时, 将这 22 条远场地震动的加速度幅值统一调幅至 $0.2g$. 基础隔震能够显

著降低横向对应的楼层加速度和位移^[25], 因此沿 X 方向单向加载, 分析 4 个摩擦系数的弹性滑板支座对楼层反应谱的影响. 由于结构顶层的楼层反应谱峰值最大, 因此绘制了弹性滑板支座隔震结构的顶层楼层反应谱曲线, 如图 7~图 9 所示.

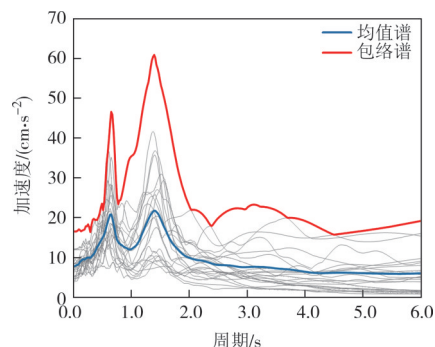
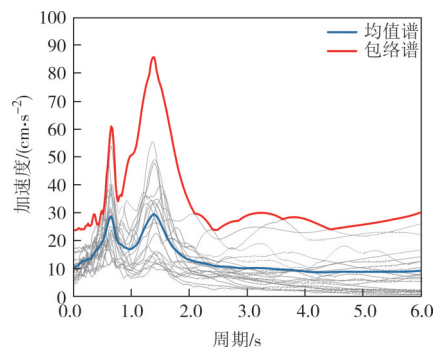
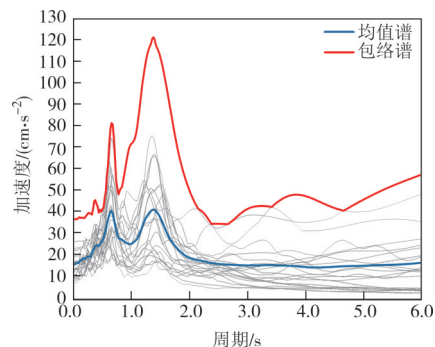
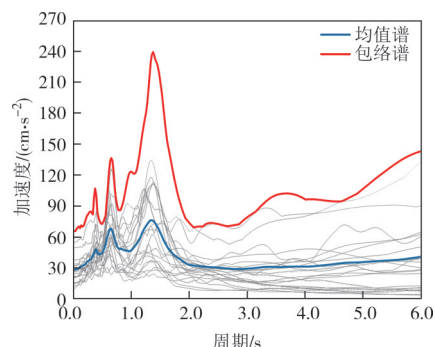
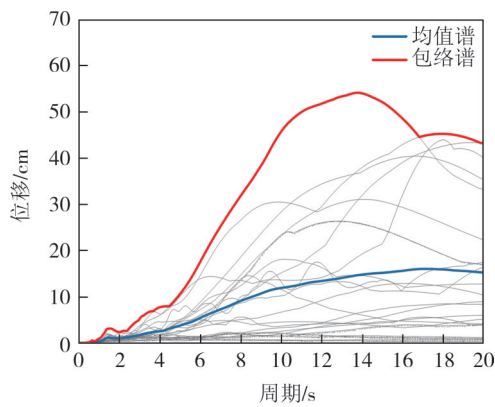
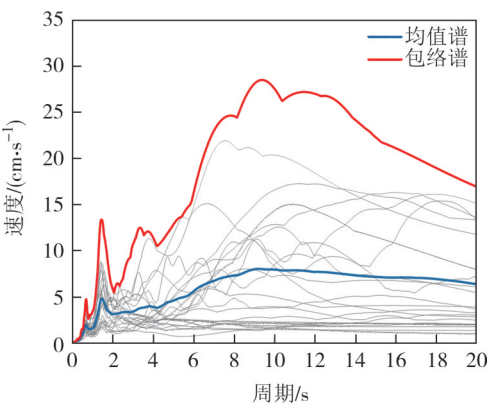
(a) $\mu=0.01$ (b) $\mu=0.05$ (c) $\mu=0.10$ (d) $\mu=0.20$

图7 顶层加速度反应谱

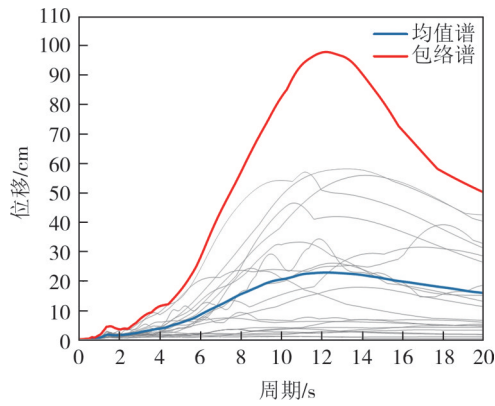
Fig.7 Top-level acceleration response spectra



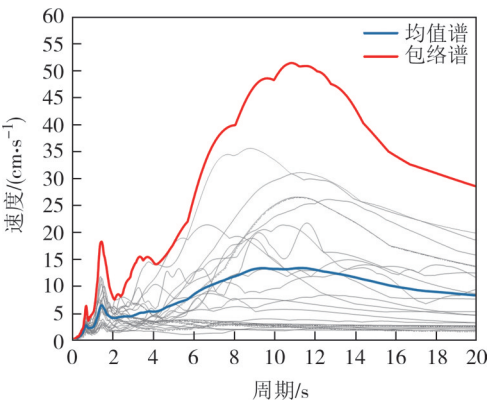
(a) $\mu=0.01$



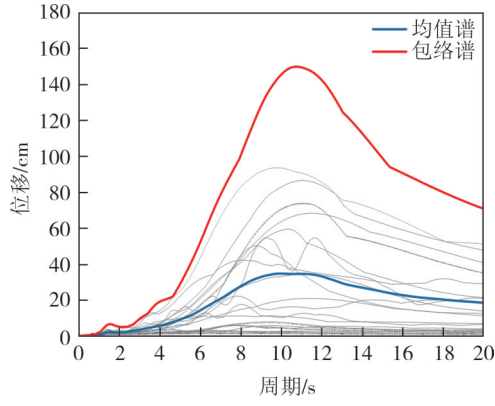
(a) $\mu=0.01$



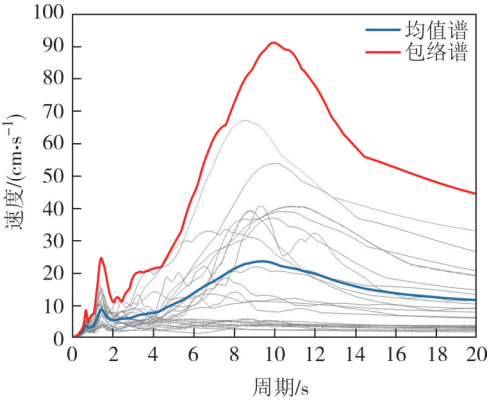
(b) $\mu=0.05$



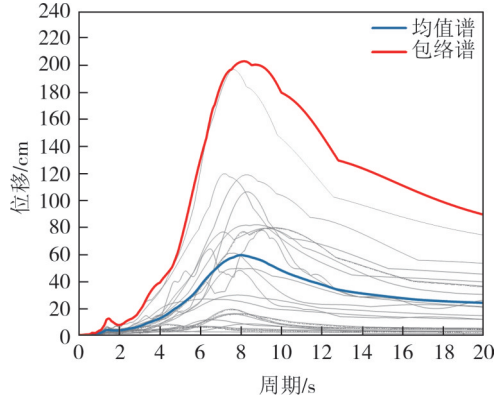
(b) $\mu=0.05$



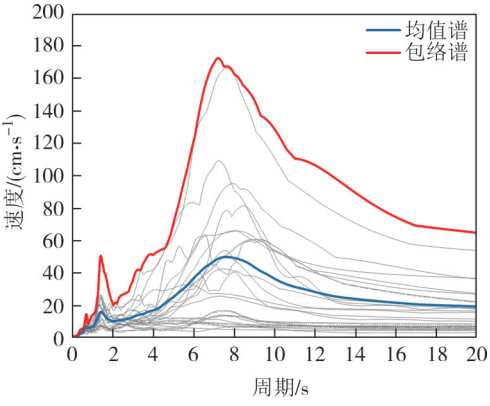
(c) $\mu=0.10$



(c) $\mu=0.10$



(d) $\mu=0.20$



(d) $\mu=0.20$

图8 顶层位移反应谱

图9 顶层速度反应谱

Fig.8 Top-level displacement response spectra

Fig.9 Top-level velocity response spectra

由图分析可知:在22条远场地震动作用下,随着摩擦系数的减小,楼层均值反应谱的峰值降低,不同摩擦系数的各楼层反应谱规律和趋势基本一致,楼层包络反应谱和均值反应谱仅在数值大小上有差别,变化趋势一致。

对于顶层加速度反应谱,摩擦系数不影响楼层反应谱峰值对应的周期。当周期 T 在0~1 s和1~2 s两个区间时谱值随周期急剧增大,出现峰值现象,这是地震波和上部结构共同作用的结果,当附属结构的自振周期与地震动卓越周期接近时可能发生共振效应,使得楼层反应谱产生很高的峰值;周期 $T>2$ s时谱值快速下降直至缓慢减小至趋于0,结构基本振型周期距离地震动卓越周期越远,楼层反应谱值越低。

对于楼层位移反应谱,谱值随着周期的增大而增大,达到峰值后减小最后趋于稳定值,不再随周期变化;随着摩擦系数的增大,位移反应谱峰值对应的周期提前,但峰值对应的周期均在6 s之后。

对于顶层速度反应谱,当周期 T 在0~2 s内谱值随周期增大出现第一次峰值,这是地震动和上部结构发生共振效应的结果,后继续随周期的增大而增大并出现第二次峰值,但随着摩擦系数的增大,第二次峰值对应的周期会提前,但周期均在6 s之后。

4.2 铅芯橡胶支座结构的楼层反应谱

在ETABS软件中对铅芯橡胶支座隔震结构输入22条远场地震动加速度时程,进行非线性时程分析,为了便于比较分析,同样得到顶层的楼层反应谱曲线,如图10(a)~(c)所示。

如图所示:铅芯橡胶支座结构的楼层反应谱变化趋势和弹性滑板支座基本一致,但其谱峰值对应的周期不同,铅芯橡胶支座结构的加速度峰值出现在0~1 s内,位移谱和速度谱峰值均在3.5 s(结构自振周期)左右出现。

4.3 弹性滑板支座与橡胶支座的楼层反应谱比较

本文结构采用弹性滑板支座和铅芯橡胶支座两种隔震装置,两种隔震结构的水平减震系数基本一致,因此将弹性滑板支座结构和铅芯橡胶支座结构的楼层包络反应谱进行比较,说明在一定的摩擦系数范围内弹性滑板支座的隔震性能优于铅芯橡胶支座,如图11(a)~(c)所示。由图可知:在22组远场地震动作用下,4种摩擦系数的弹性滑板支座结构的加速度包络反应谱谱值远小于铅芯橡胶支座的谱值,且弹性滑板支座结构加速度谱峰值对应的周期大于

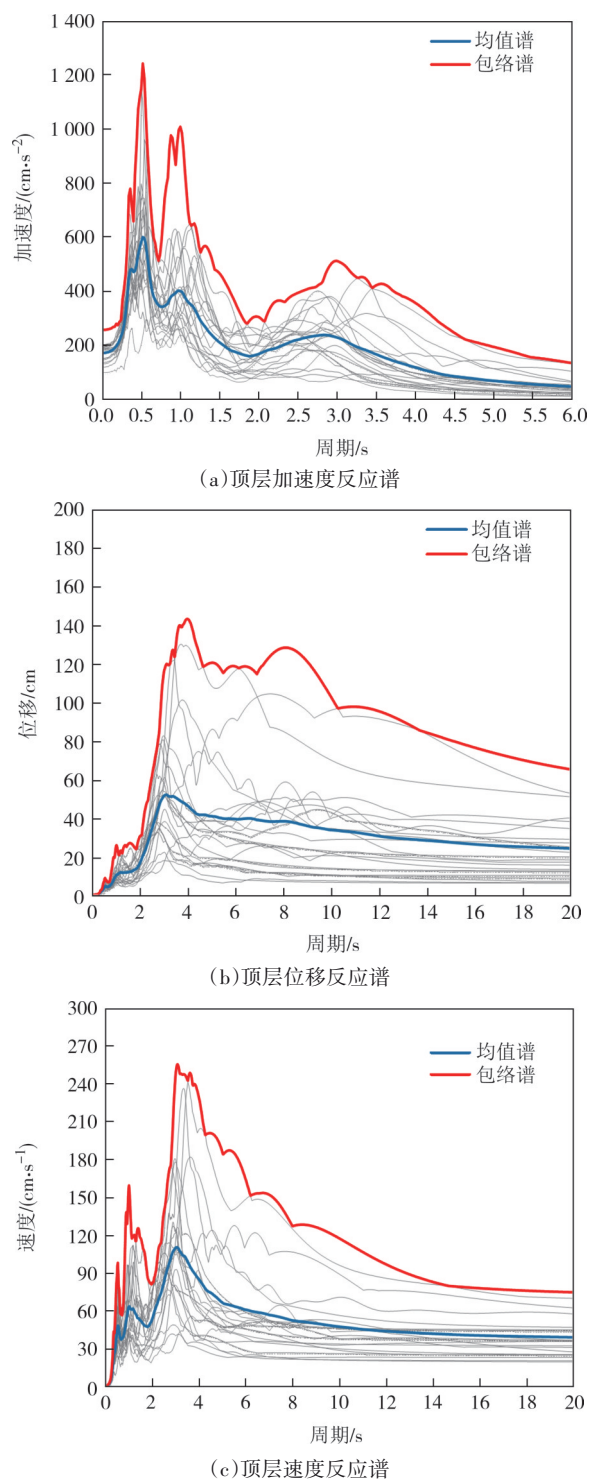


图10 铅芯橡胶支座结构顶层楼层反应谱

Fig.10 Lead core rubber bearing structural top floor response spectra

铅芯橡胶支座,说明弹性滑板支座能够较好地延长结构的周期;在0~6 s周期内,4种摩擦系数的弹性滑板支座的位移和速度反应谱谱值均小于铅芯橡胶支座,在6 s之后高摩擦系数的弹性滑板支座反应谱峰值反而大于铅芯橡胶支座。

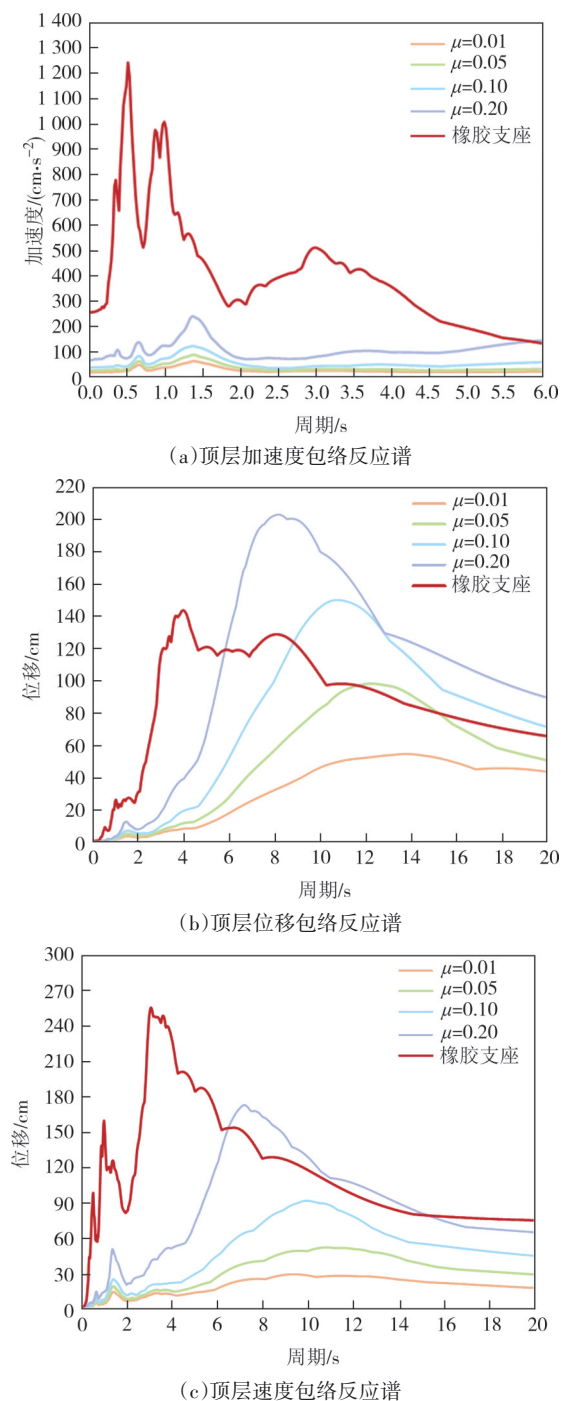


图 11 弹性滑板支座与橡胶支座的楼层反应谱比较图

Fig.11 Floor response spectra comparisons of elastic slide bearing and rubber bearing figures

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文使用有限元软件 ETABS 建立楼层反应谱的 Benchmark 模型,研究了在 22 组远场地震动作用下弹性滑板支座的摩擦系数对楼层反应谱的影响,对弹性滑板支座结构与橡胶支座结构的楼层反应谱进行比较,得出结论如下:

1)在弹性滑板支座隔震结构中,隔震层的水平等效刚度随摩擦系数的增大而增大,楼层反应谱的谱值也随摩擦系数的增大而增大。

2)在周期 0~6 s 内,摩擦系数不改变楼层反应谱峰值对应的周期,楼层反应谱是地震动与主体结构共同作用的结果,当地震动卓越周期和附属结构自振周期接近,即发生共振效应时,楼层反应谱会产生峰值。楼层反应谱的频谱特征与摩擦系数无关。

3)在本文结构中,在周期 0~6 s 内 4 种摩擦系数的弹性滑板支座楼层反应谱谱值均小于铅芯橡胶支座,在周期 6 s 之后,摩擦系数 μ 为 0.01 和 0.05 的弹性滑板支座的反应谱谱值均小于铅芯橡胶支座,说明在 22 组远场地震动下摩擦系数 μ 在 0.01~0.05 范围内的弹性滑板支座的隔震性能优于铅芯橡胶支座。相较于传统的橡胶支座,弹性滑板支座在远场长周期地震动作用下隔震性能更优。

5.2 研究展望

长周期地震动是隔震系统的主要克星^[26],长周期地震动具有低频占比多、峰值加速度普遍小和卓越周期长等特点,对自振周期较长的建筑结构如隔震建筑结构造成较大的破坏。在本文研究远场普通地震动对弹性滑板支座结构楼层反应谱影响的基础上,进一步研究长周期地震动对滑板支座隔震结构楼层反应谱的影响。

5.2 研究展望

1)分析讨论不同长周期地震动作用下的楼层反应谱,对比常规地震与长周期地震动对楼层反应谱的影响。

2)通过计算分析,在地震动作用下弹性滑板支座结构隔震性能优于铅芯橡胶支座结构,利用本文的 Benchmark 模型,进一步在隔震层增设智能阻尼器^[27],系统研究长周期地震动下智能隔震对楼层反应谱的影响,以解决弹性滑板支座被动隔震结构隔震层滑移量过大等核心问题。

1)分析讨论不同长周期地震动作用下的楼层反应谱,对比常规地震与长周期地震动对楼层反应谱的影响。

2)通过计算分析,在地震动作用下弹性滑板支座结构隔震性能优于铅芯橡胶支座结构,利用本文的 Benchmark 模型,进一步在隔震层增设智能阻尼器^[27],系统研究长周期地震动下智能隔震对楼层反应谱的影响,以解决弹性滑板支座被动隔震结构隔震层滑移量过大等核心问题。

参考文献

- [1] PENG Y B, DING L C, CHEN J B, et al. Shaking table test of seismic isolated structures with sliding hydromagnetic bearings [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(9): 04020174.
- [2] 薛彦涛. 建筑结构隔震技术现状与应用[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 82-87.
- [3] XUE Y T. Status and application of base-isolation technique of buildings [J]. Building Structure, 2011, 41 (11) : 82-87. (in Chinese)
- [3] 王彦超, 苏永涛, 刘景琛. 核电厂安全厂房楼层反应谱计算分

- 析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊1): 723-726.
- WANG Y C, SU Y T, LIU J C. Calculation and analysis of floor response spectrum for nuclear power plant safety building [J]. Building Structure, 2021, 51(Sup.1): 723-726. (in Chinese)
- [4] 曾奔, 周福霖, 徐忠根. 隔震结构基于功率谱密度函数法的楼层反应谱分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 36-39.
- ZENG B, ZHOU F L, XU Z G. Floor response spectra analysis of base-isolated structure based on PSDF [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2): 36-39. (in Chinese)
- [5] 黄海荣, 朱玉华. 基础隔震结构反应谱研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(3): 123-129.
- HUANG H R, ZHU Y H. Studies on design response spectrum for base-isolated structures [J]. Structural Engineers, 2010, 26(3): 123-129. (in Chinese)
- [6] ISAKOVIĆ T, ZEVIK J, FISCHINGER M. Floor response spectra in isolated structures subjected to earthquakes weaker than the design earthquake—Part I: Isolation with high-damping rubber bearings [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2011, 18(6): 635-659.
- [7] 韩森, 许浒, 杜红凯, 等. 近断层地震下层间隔震结构楼层反应谱[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(4): 42-49.
- HAN M, XU H, DU H K, et al. Research on floor response spectrum of storey seismic isolation structure under near-fault earthquake [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 42-49. (in Chinese)
- [8] 王亚, 杨维国, 王萌, 等. 地震作用下某大型隔震博物馆楼层波及楼层反应谱研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(8): 203-209.
- WANG Y, YANG W G, WANG M, et al. Floor wave and floor response spectrum research of one large base-isolated museum under earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(8): 203-209. (in Chinese)
- [9] BERTO L, BOVO M, ROCCA I, et al. Seismic safety of valuable non-structural elements in RC buildings: floor response spectrum approaches [J]. Engineering Structures, 2020, 205: 110081.
- [10] 党育, 李国宝, 谢鹏飞. 基础隔震结构的楼面设计反应谱研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 321-332.
- DANG Y, LI G B, XIE P F. Floor design response spectrum of base-isolated structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(7): 321-332. (in Chinese)
- [11] 荣强, 盛严, 程文灏. 滑移隔震支座的试验研究及力学模型[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 40-45.
- RONG Q, SHENG Y, CHENG W R. Experimental investigation and mechanical model of sliding isolation bearings [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 40-45. (in Chinese)
- [12] 王昱翔, 叶昆. 多级地震作用下 LRB 隔震多层结构抗震性能分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(11): 1-14.
- WANG Y X, YE K. Seismic performance analysis of LRB base-isolated multi-story structures subjected to multi-level earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(11): 1-14. (in Chinese)
- [13] 靳涛, 戴纳新. 黏滞阻尼器不同布置对楼层反应谱的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(03): 1122-1130.
- JIN T, DAI N X. Influences of different layout schemes of viscous dampers on floor response spectrum [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 1122-1130. (in Chinese)
- [14] 贾瑜. 刚性滑板隔震支座实用化设计方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- JIA Y. Research on practical design method of rigid sliding isolation bearings [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] 陈永祁, 杨凤利, 刘林. 摩擦摆隔震桥梁的设计及应用[J]. 工业建筑, 2009, 39(增刊1): 256-261.
- CHEN Y Q, YANG F L, LIU L. Design and application of friction pendulum bearing for seismic isolated bridges [J]. Industrial Construction, 2009, 39(Sup.1): 256-261. (in Chinese)
- [16] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 14-16.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 14-16. (in Chinese)
- [17] 熊仲明, 黄汉英, 虞子良, 等. 带限位装置的基础隔震结构反应谱研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(2): 172-178.
- XIONG Z M, HUANG H Y, YU Z L, et al. Response spectra of base-isolated structure with limiting stopper [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 172-178. (in Chinese)
- [18] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 (2016 edition) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [19] 罗佳润, 马玉宏, 沈朝勇, 等. 隔震设计中橡胶隔震支座拉压刚度取值的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 232-240.
- LUO J R, MA Y H, SHEN C Y, et al. Research on the ratio of tensile and compressive stiffness of rubber isolators in the isolation design [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(5): 232-240. (in Chinese)
- [20] MOUSTAFA A, UENO K, TAKEWAKI I. Critical earthquake loads for SDOF inelastic structures considering evolution of seismic waves [J]. Earthquakes and Structures, 2010, 1(2): 147-162.
- [21] Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors [R]. America: FEMA, 2009.
- [22] FLORES F X, ASTUDILLO B X, POZO S. Effective modeling of special steel moment frames for the evaluation of seismically induced floor accelerations [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(1): 04020311.
- [23] 刘燕军, 林皋, 李建波, 等. 计算核电厂楼层反应谱的直接法及其对比分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 93-99.
- LIU Y J, LIN G, LI J B, et al. A direct method for computation of floor response spectrum of a nuclear power plant [J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 93-99. (in Chinese)
- [24] FLORES F X, ASTUDILLO B X, BARRERA D V, et al. Level of detail required to model special steel moment frames to evaluate floor accelerations in nonstructural components [C]//Structures Congress 2019. Orlando, Florida. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019.
- [25] KAMBLE V, BHARTI S D, SHRIMALI M K, et al. Control of secondary systems response in a base-isolated building under tridirectional ground motion [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2022, 27(1): 04021060.
- [26] 谢礼立, 翟长海. 核电工程应用隔震技术的可行性探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(1): 1-10.
- XIE L L, ZHAI C H. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(1): 1-10. (in Chinese)
- [27] 戴纳新, 李圣彬, 蒋炳炎, 等. 一种双出杆压电-磁流变复合智能阻尼器及其控制方法: CN112805489A[P]. 2021-05-14.
- DAI N X, LI S B, JIANG B Y, et al. Dual extruding, piezoelectricity and magnetorheological composite and intelligent damper and control method therefor: CN112805489A [P]. 2021-05-14. (in Chinese).