

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231009002

不同上部结构高宽比的土-桩-隔震结构体系 地震响应分析*

单志承¹, 于旭², 庄海洋³, 吴晓飞⁴

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167;
3. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 4. 南京江宁经济技术开发区集团有限公司, 江苏 南京 211167)

摘要: 为探究高宽比因素对柔性地基上基础隔震结构地震响应的影响, 基于ABAQUS有限元软件建立了四种不同高宽比的传统抗震以及基础隔震框架结构模型, 针对不同场地条件, 建立柔性和刚性两种地基上的隔震结构模型对比, 分析SSI效应对不同高宽比隔震结构地震反应规律及其隔震效率的影响。结果表明: 随着高宽比增加, 隔震结构楼层加速度峰值随层号增加先减小后增大, 隔震层位移不断减小, 隔震效率逐渐降低, 但不同高宽比结构隔震效率随层号增加变化的规律不一致。当结构高宽比较小时, 隔震效率在顶层最好; 随着结构高宽比增大, 隔震效率最优层出现在结构中间靠上部。此外, 选取楼层加速度峰值、隔震层位移和隔震效率为研究参量, 得出SSI效应在隔震层和结构顶层的影响明显强于其他楼层, SSI效应会增大隔震结构隔震层的位移反应, 降低隔震体系的隔震效率, 并且这种不利影响随着隔震结构高宽比增大在增强, 因而在进行隔震结构设计时应综合考虑上部结构高宽比与SSI效应联合作用对结构可能产生的影响。

关键词: 基础隔震结构; 桩基础; 高宽比; 地震响应; 隔震效率

中图分类号: TU352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0405-11

Seismic Response Analysis of Soil-Pile-Isolated Structures with Different Aspect Ratios of Superstructure

SHAN Zhicheng¹, YU Xu^{2*}, ZHUANG Haiyang³, WU Xiaofei⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Department of Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. Nanjing Jiangning Economic Technology Development General Company, Nanjing 211167, China)

Abstract: To explore the influence of aspect ratio on the seismic responses of base-isolated structures built on flexible foundations, four traditional seismic-resistant and base-isolated frame structure models with different aspect ratios were established using ABAQUS finite element software. For different site conditions, models of base-isolated structures on both flexible and rigid foundations were estab-

* 收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(51778282)资助

作者简介: 单志承(1999—), 男, 硕士研究生。主要从事考虑土-结构动力相互作用的隔震结构抗震性能研究。

E-mail: 2215468165@qq.com

通信作者: 于旭(1977—), 男, 教授, 博士。主要从事考虑土-结构动力相互作用的隔震结构抗震性能研究。

E-mail: yuxurichard@sina.com

lished for comparison, so as to analyze the influence of Soil-Structure Interaction (SSI) effect on the seismic response patterns and isolation efficiency in structures with different aspect ratios. The results showed that with the increase of the aspect ratio, peak floor accelerations in isolated structures first decreased and then increased with increasing floor levels. Meanwhile, the displacement of the isolation layer continuously decreased, and the isolation efficiency gradually decreased. However, the variation patterns of the isolation efficiency with increasing floor levels were inconsistent among structures with different aspect ratios. For structures with smaller aspect ratios, the isolation efficiency was optimal at the top floor. As the aspect ratios increased, the optimal isolation efficiency layer appeared in the upper middle floors. Furthermore, by using peak floor acceleration, isolation layer displacement, and isolation efficiency as research parameters, it was concluded that SSI effect showed significantly stronger influence on isolation layers and top floor of structures compared to other floors. The SSI effect increased the displacement response of isolation layer in isolated structures and reduced the isolation efficiency of the isolation system. This adverse influence intensified with increasing aspect ratios of isolated structures. Therefore, when designing isolated structures, the combined influence of the aspect ratio of the superstructure and the SSI effect on structures should be comprehensively considered.

Keywords: base-isolated structure; pile foundation; aspect ratio; seismic response; isolation efficiency

0 引言

建筑结构高宽比是指结构的高度与结构平面有效宽度的比值,合理的设置建筑结构高宽比是控制高层建筑抗倾覆问题的有效措施,更能对结构刚度、承载能力和整体稳定性进行宏观控制。不同的结构体系高宽比有着不同的限值要求,《建筑抗震设计规范》^[1]中对隔震结构的高宽比有明确要求:结构高宽比宜小于4。随着近几十年来经济与社会的发展,基础隔震结构的应用范围不断扩大,对基础隔震高层结构动力特性的分析研究也在不断加深^[2-6]。E.Takaoka等^[7]通过振动台试验测试大高宽比基础隔震结构隔震层的极限破坏模式,并提出一种可预测基础隔震结构极限性能的时程响应分析方法;余文正等^[8]基于一阶振型简化设计方法,推导出地震下支座竖向力计算公式,并讨论了结构周期、场地类别、支座布置等参数对结构高宽比限值的影响;冯绍林等^[9]以某四栋高层建筑为例,探讨了不同高宽比隔震结构的地震响应;何文福等^[10]通过振动台试验研究不同高宽比结构的摇摆角响应并得出摇摆角随高宽比增加而增大的结果。上述研究虽获得不同高宽比结构的动力特性,但均未能考虑SSI效应的影响,而柔性地基上基础隔震结构高宽比增加后其上部结构自振周期较长,与SSI效应的影响将会产生耦合效应,从理论上讲可能会对基

础隔震结构产生不利影响,因此对不同高宽比的柔性地基上基础隔震结构动力特性响应进行系统的分析还有待研究。

综上所述,本文以某基础隔震结构的实际工程^[11]为背景,采用增减楼层的方式来改变高宽比,并对梁柱截面尺寸以及隔震支座参数做出相应设计调整,在规范要求范围内扩展设计出4种不同高宽比的隔震与对应非隔震结构,利用大型商用有限元软件ABAQUS建立了土-桩-隔震支座-上部结构静动力耦合非线性相互作用体系的有限元模型,分析不同高宽比基础隔震结构在地震作用下的动力反应特征,并与对应高宽比的非隔震结构进行比较,探讨了SSI效应和上部结构高宽比联合作用对隔震结构地震响应以及隔震效率的影响规律。

1 数值模型的建立

1.1 几何模型的建立

本文建立的模型是以江苏某隔震建筑的设计方案为原型进行扩展设计。原设计方案中,建筑结构为地上12层,地下1层,底层层高3.6 m,标准层层高3.3 m,地上部分纵向六跨共48 m长,横向三跨共18 m宽。本文通过增减楼层数将结构分别调整为6、9、12、15层4种结构并且对框架柱的截面尺寸以及隔震层的参数做出相应调整,定义 R 为结构的高宽比,调整后结构的高宽比分别为1.12、1.67、

2.22、2.77,满足规范中高宽比小于4和框架结构建筑高度不超过50 m的要求。

地基土层采用三维实体单元,为消除地基侧向截取对模型动力反应的不利影响,依据楼梦麟等^[12]研究理论,场地的宽度需要大于结构宽度的5倍,因此本文研究中土层宽度取240 m。土层厚度取60 m,沿土层厚度方向将其分为3层,分别赋予设计的土层参数,并且在土层的上表面中间处按照设计尺寸切出结构地下室充当基础。基础采用桩和箱基的复合基础,箱基尺寸与上部结构平面尺寸一致,埋深为4.5 m,按照设计文件在对应位置嵌入柱子并在柱底布置好桩,桩长为18 m。模型中梁柱均采用三维梁单元建立,楼面板采用壳单元建立,在材料属性中分别对其赋予相应的截面尺寸和厚度,上部结构的梁板之间采用绑定连接。为确保得到较为精确的计算结果,同时尽量减小运算时间,土体单元采用线性减缩积分C3D8R,设置网格属性为enhanced来克服网格沙漏问题,网格划分在靠近结构处加密,远离结构的区域网格横向尺寸从1 m逐渐增大到4 m。地基模型边界采用静、动耦合处理技术^[13],静力分析中采用滚轴边界,限制底部的位移及转动并将其假定为基岩面;动力分析中模型基岩处固定竖向,同时依据时程施加地震荷载,左右边界利用反力RF限制土体扩张。该方法可以考虑土体在静力条件下的应力状态对整体结构的影响,使结果更加贴切实际地基模型。结构模型示意如图1所示。

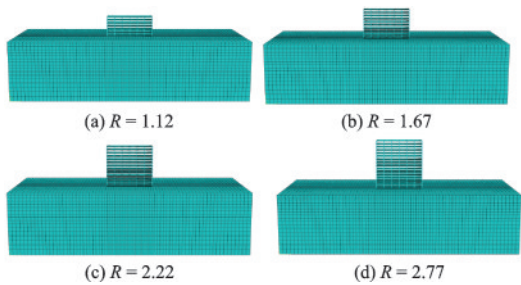


图1 模型示意

Fig.1 Schematic diagram of model

1.2 材料参数及本构模型

《建筑抗震设计规范》^[1]中规定了隔震建筑宜设置在I、II、III类场地条件下,而现有研究表明场地条件越软SSI效应对结构动力响应的影响越明显,为便于研究SSI效应对隔震结构地震响应及隔震效

率的影响程度,本文模型场地类别选择III类场地(为表述方便,本文中用柔性地基代指III类场地),土层参数见表1,地基土模型采用庄海洋等^[14]建立的土体粘塑性动力本构模型,上部结构及基础采用C30混凝土,混凝土对应的模型参数见文献^[15],钢筋型号为Q235钢筋,弹性模量为210 GPa。

表1 场地条件及其参数

Table 1 Site conditions and their parameters

土层编号	土性	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	层厚/ m	动泊 松比	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)
1	黏土	1800	10	4.5	0.49	22.6	12
2	砂土	1960	26.3	15.5	0.49	5.5	32.9
3	黏土	1940	38.9	40	0.49	37.6	11.2

1.3 隔震支座设计及参数选取

本文采用铅芯橡胶隔震支座,在ABAQUS有限元建模中通过Spring功能在三个方向上建立线性弹簧并施加阻尼来模拟隔震支座。隔震支座沿柱底布置,参照方案建筑中12层结构的设计报告,按照文献^[16]中给定的隔震支座参数表进行选取,分别对6、9、15层结构隔震层参数进行调整,隔震支座设计参数详见表2,根据于旭等^[17]对于基础隔震结构的振动台试验与数值模拟对比验证,水平刚度 k 按100%剪应变取值,阻尼系数 c 公式如下:

$$c = \frac{2\xi}{\omega} k \quad (1)$$

式中, ξ 为支座的等效阻尼比; ω 为结构的自振频率。

1.4 输入地震动及工况加载

输入不同特性的地震动时得到的结构地震响应不同,因此合理的选取输入地震动是很有必要的,在选取地震动时需要充分考虑地震动强度及地震动频谱特性等要素。本文通过计算峰值加速度(PGA)与峰值速度(PGV)的比值得出振动频率,依据兼顾低、中、高频振动特性原则,分别选取Kobe波、什邡八角波以及卧龙波作为输入地震动,加速度时程如图2所示。三条地震动中什邡八角波属于低频振动波;Kobe波属于中频振动波;卧龙波属于高频振动波。本文研究将地基分为柔性地基和刚性地基,为确保两种地基的结果对比具有可比性,两种地基条件下应该具有相同

表2 隔震支座参数

Table 2 Parameters of isolation bearings

高宽比 R	选用支座直径/mm	容许水平位移/mm	竖向承载力/kN	水平等效刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	屈服后刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	竖向刚度/ $(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	等效阻尼比/%
1.12	700	385	5 770	1.50	0.88	2 800	24
1.67	800	440	7 535	1.83	1.18	3 400	23
2.22	900	495	9 530	2.10	1.32	3 900	22
2.77	1 100	605	14 240	2.67	1.64	4 400	23

的地表加速度峰值,柔性地基时将基岩输入地震动的峰值加速度分别调整为0.05g、0.1g、0.15g,地震动从地基土底部边界水平向输入;对于刚性地

基,读取柔性地基下地表记录的加速度时程作为输入地震动作用于结构底部,地震动具体加载方案见表3。

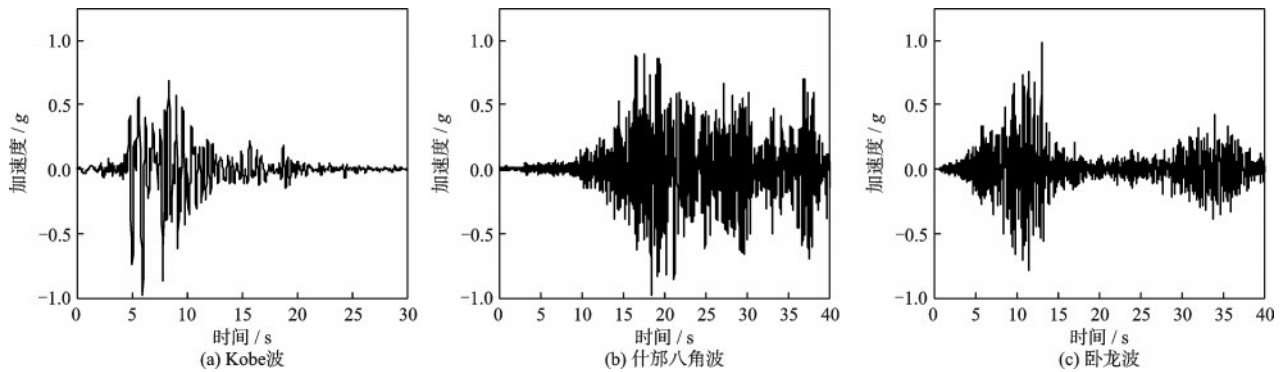


图2 输入地震波时程

Fig.2 Time histories of input seismic waves

表3 地震动加载工况

Table 3 Loading conditions of ground motions

序号	工况编号	地震波	基岩输入加速度峰值(PBA)/g	地表实测加速度峰值(PGA)/g
1	KB1	Kobe波	0.05	0.108 9
2	KB2	Kobe波	0.10	0.156 6
3	KB3	Kobe波	0.15	0.192 9
4	SF1	什邡八角波	0.05	0.141 1
5	SF2	什邡八角波	0.10	0.180 9
6	SF3	什邡八角波	0.15	0.217 6
7	WL1	卧龙波	0.05	0.119 3
8	WL2	卧龙波	0.10	0.176 6
9	WL3	卧龙波	0.15	0.221 1

2 结构地震反应

2.1 结构模态分析

隔震的原理是通过设置隔震层来延长结构的自振周期,避开地震动主频带范围,减免共振以达

到减小结构地震响应的目的。本文利用ABAQUS的线性摄动频率分析功能,对四种隔震与非隔震结构有限元模型分别进行振型分析。表4给出了不同结构的自振周期和阻尼比,通过对比可以看出隔震层的设置提高了结构的阻尼,延长了结构的周期,使得结构的自振周期尽量远离地震动周期,因而可以有效降低结构的地震反应。

表 4 结构自振周期及阻尼比

Table 4 Natural vibration periods and damping ratios of structure

高宽比 R	非隔震结构自振周期/s	隔震结构自振周期/s	非隔震结构阻尼/%	隔震结构阻尼比/%
1.12	0.945	2.049	4.34	12.10
1.67	1.359	2.534	2.71	8.32
2.22	1.887	2.973	1.63	5.44
2.77	2.344	3.421	1.22	3.72

2.2 结构加速度峰值反应

加速度响应作为分析结构的一个重要参数,与地震作用力直接相关。图 3~6 为四种高宽比隔震与非隔震结构分别在 Kobe 波、什邡八角波、卧龙波作用下各楼层的加速度峰值对比,图中楼层号-1 表示隔震支座底部,楼层号 0 表示一层结构底部。总体上来看三种地震动下结构楼层加速度峰值变化规律大致相同,都表现为隔震结构在隔震层处的加速度峰值较大,上部结构沿着高度方向呈先减小后增大的趋势,与王栋等^[18]开展的基础隔震高层钢框架结构振动台试验规律相似;非隔震结构的加速度

反应表现为沿着层高逐渐增大,在顶层处达到最大值,各楼层的加速度峰值远远大于同等条件下隔震结构。随着结构高宽比的增加,非隔震结构的加速度曲线变得更为复杂,这是由于地震作用下高层结构的二阶或更高阶振型参与更显著,而隔震结构受到的影响就比较小。

为了更直观的对比不同高宽比结构隔震效果的差异,表 5 以地震反应最为明显的 Kobe 波为例,给出了四种高宽比的隔震与非隔震结构楼层加速度反应峰值之比,加速度反应峰值比可以衡量结构的隔震效率,其值越小表明隔震效率越高。可以看出,当结构高宽比较小, $R = 1.12、1.67$ 时,结构楼层

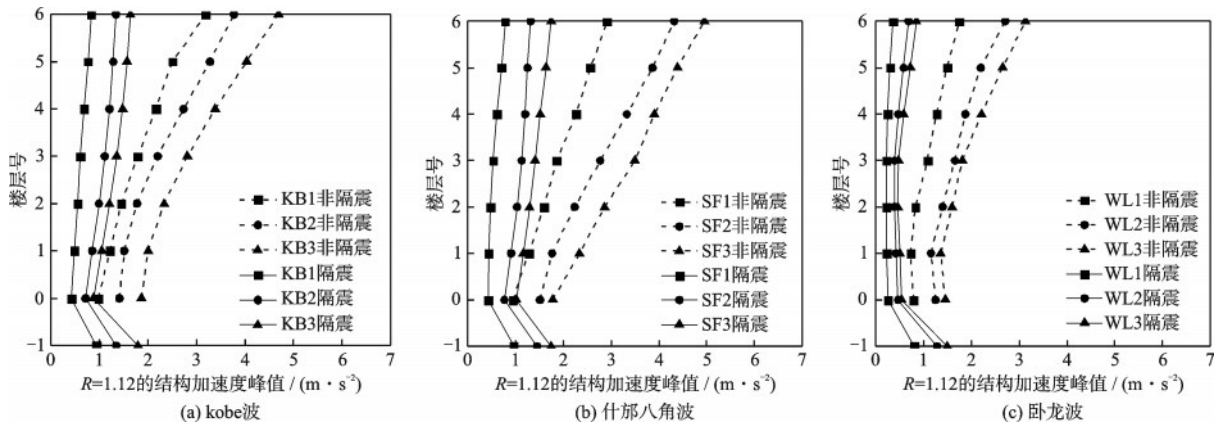


图 3 高宽比 $R = 1.12$ 的非隔震结构与隔震结构的加速度反应

Fig.3 Acceleration responses of non-isolated and isolated structures with an aspect ratio $R = 1.12$

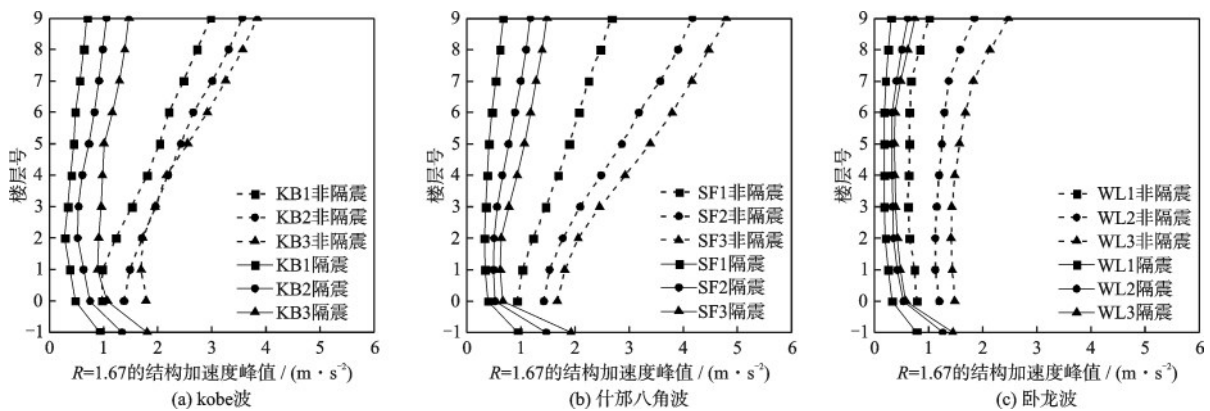


图 4 高宽比 $R = 1.67$ 的非隔震结构与隔震结构的加速度反应

Fig.4 Acceleration responses of non-isolated and isolated structures with an aspect ratio $R = 1.67$

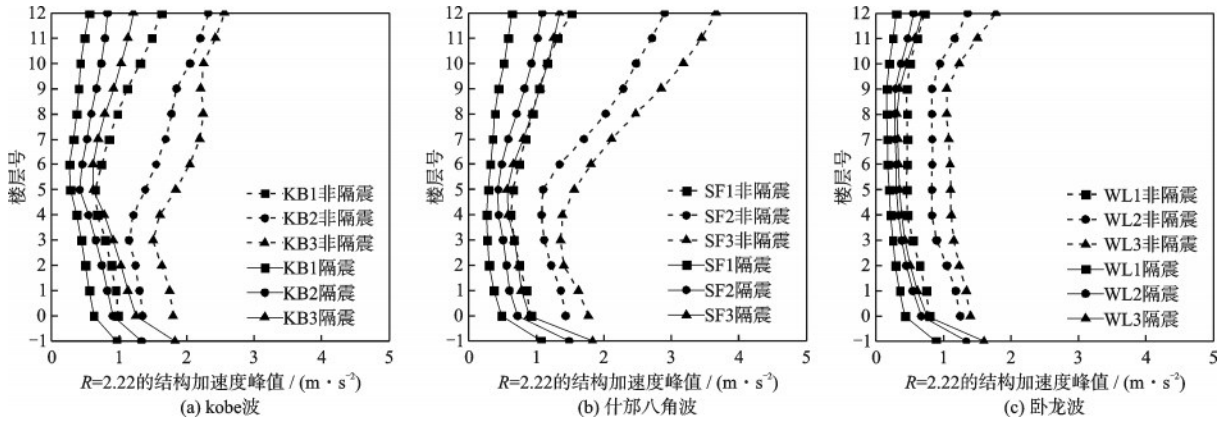


图5 高宽比 $R = 2.22$ 的非隔震结构与隔震结构的加速度反应

Fig.5 Acceleration responses of non-isolated and isolated structures with an aspect ratio $R = 2.22$

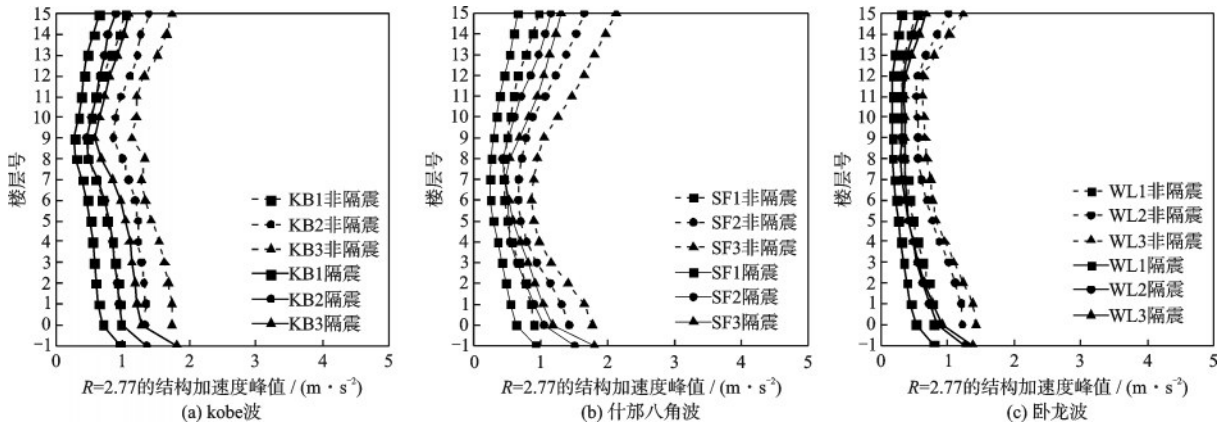


图6 高宽比 $R = 2.77$ 的非隔震结构与隔震结构的加速度反应

Fig.6 Acceleration responses of non-isolated and isolated structures with an aspect ratio $R = 2.77$

表5 Kobe波作用下隔震与非隔震结构楼层加速度峰值反应比

Table 5 Peak floor acceleration response ratios of isolated and non-isolated structures under Kobe wave

层号	$R = 1.12$			$R = 1.67$			$R = 2.22$			$R = 2.77$		
	KB1	KB2	KB3	KB1	KB2	KB3	KB1	KB2	KB3	KB1	KB2	KB3
15										0.62	0.64	0.63
14										0.60	0.61	0.61
13										0.57	0.59	0.60
12							0.34	0.36	0.47	0.61	0.60	0.60
11							0.33	0.36	0.46	0.64	0.62	0.59
10							0.32	0.36	0.46	0.64	0.60	0.54
9				0.23	0.29	0.38	0.36	0.36	0.41	0.58	0.53	0.50
8				0.23	0.30	0.39	0.38	0.33	0.35	0.63	0.48	0.51
7				0.22	0.31	0.40	0.38	0.31	0.32	0.66	0.57	0.66
6	0.26	0.36	0.35	0.21	0.31	0.40	0.37	0.29	0.30	0.67	0.61	0.72
5	0.30	0.39	0.39	0.22	0.30	0.39	0.43	0.30	0.34	0.67	0.65	0.73
4	0.32	0.42	0.44	0.22	0.28	0.45	0.55	0.45	0.49	0.65	0.69	0.71
3	0.34	0.50	0.48	0.22	0.28	0.49	0.56	0.57	0.61	0.65	0.69	0.70
2	0.38	0.50	0.52	0.23	0.31	0.53	0.57	0.60	0.63	0.65	0.69	0.70
1	0.40	0.52	0.53	0.38	0.42	0.53	0.59	0.63	0.65	0.66	0.70	0.70
0	0.44	0.50	0.53	0.48	0.55	0.60	0.63	0.68	0.69	0.73	0.74	0.74

加速度峰值反应比随层号增加呈逐步降低的趋势,结构在顶层处的隔震效果最好;随着高宽比的增大, $R = 2.22、2.77$ 时,加速度峰值反应比随着楼层号先减小后增大,最小值出现在结构中间靠上部的楼层,这可能是由于高宽比增加后,结构的“鞭鞘效应”放大了地震波在结构顶层附近的加速度峰值所导致的。整体上而言,楼层数越多即高宽比越大,楼层加速度峰值比越大,结构隔震效果越差,隔震效率最佳处由顶层逐渐向中层转移。

2.3 隔震层位移

结构位移响应是隔震结构研究的重要指标之一,在实际工程中受关注较多,与非隔震结构相比,隔震结构的变形主要集中于隔震层,其位移值远远大于上部结构的位移,上部结构相对地面运动以平动为主,故本文将隔震层的位移反应作为隔震结构地震响应的重要参数以及衡量支座工作状态是否正常的指标。表6给出了四种高宽比隔震结构在不同地震动下隔震层位移情况。

表6 四种高宽比隔震结构在不同地震动下的隔震层位移

Table 6 Isolation layer displacements of isolated structures with four different aspect ratios under different ground motions

高宽比 R	不同地震动下隔震层位移/mm								
	Kobe波			什邡八角波			卧龙波		
	KB1	KB2	KB3	SF1	SF2	SF3	WL1	WL2	WL3
1.12	41.80	91.29	113.34	42.03	91.80	119.84	14.16	26.15	33.57
1.67	27.30	57.66	75.77	29.82	65.89	87.34	7.18	14.73	22.30
2.22	21.93	46.11	64.49	21.82	52.26	70.27	5.53	10.14	14.65
2.77	10.40	24.97	45.22	10.93	28.58	38.89	3.36	6.04	9.24

可以看出,隔震层的位移值随着结构高宽比增大而减小,输入地震动峰值相同的情况下,高宽比 $R = 2.77$ 时结构的隔震层位移只有 $R = 1.12$ 结构下的25%~30%。导致该结果的原因有两个,一方面是因为结构本身随着高宽比增加,结构柔性越大导致隔震层在地震作用下的位移减小,另一方面不同高宽比结构选取的隔震支座参数不同,因而在地震动下的位移响应有所差别。

就不同的输入地震动而言,输入卧龙波的隔震层位移值明显小于Kobe波和什邡八角波作用下的位移反应,探究其原因是因为本文采用的场地特征周期较长,场地滤波效应较为明显,因而具有高频振动特性的卧龙波地震反应最不强烈,结构地震反应明显弱于具有中、低频振动特性的Kobe波、什邡八角波,因此,地震动特性对柔性地基上隔震结构地震响应的影响是不可忽视的。

3 SSI效应对隔震结构地震响应的影响

3.1 SSI效应对隔震结构加速度响应影响

目前有关隔震结构的设计理论大多数是基于

刚性地基上假定的,忽略地基土对结构动力反应特征的影响,但在实际工程中,土-结构动力相互作用对输入地震动特性可能产生相当大的影响,并导致上部隔震结构的动力学特性发生明显的变化,从而致使在刚性地基上假定设计的隔震结构体系未能在柔性地基上满足隔震效果。因此,本文以高宽比变化为改变因素,分别进行刚性和柔性地基上隔震结构数值计算,其中,刚性地基上结构基底输入地震动为自由场地表提取的地震动。由于模型工况较多,本文以地震反应最为明显的Kobe波为例,在图7中给出了Kobe波激振时四种高宽比隔震结构在不同地基上的楼层加速度峰值响应对比。

图中结果表明基础隔震结构在刚性地基和柔性地基上的加速度反应变化规律是一致的。当结构高宽比 $R = 1.12$ 时,隔震结构楼层加速度峰值随楼层号增加而减小;随着高宽比增大,隔震结构的峰值加速度呈现为从底层到中层逐渐减小,从中层到顶层显增大趋势,且峰值加速度最小的楼层号也逐步上移。从数值上来看刚性地基上加速度反应略大于柔性地基,但差异不明显,随着输入地震动的增大,两种地基上结构楼层加速度峰值差异逐渐增加,在隔震层和结构顶

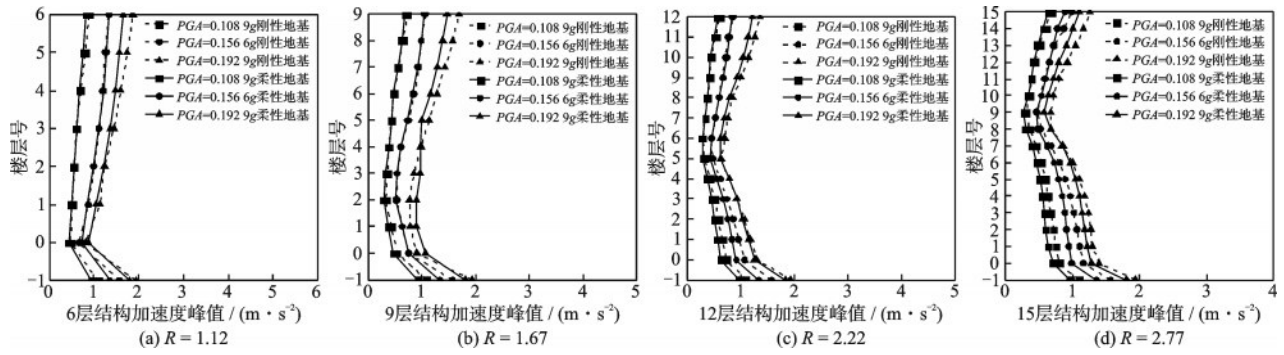


图7 Kobe波作用时隔震结构在不同地基上的加速度反应

Fig.7 Acceleration responses of isolated structures on different foundations under Kobe wave

端处尤为突出,这是由于柔性地基条件下土-结构复杂的非线性关系,使得模型体系基础顶面的加速度峰值明显小于承台侧边地基自由场地表的加速度峰值,即基底输入地震动小于自由场地震动,导致了隔震层处的加速度在两种地基上存在差异,什邡八角边与卧龙波下计算规律基本与之近似,这表明了SSI效应对隔震结构的隔震层影响更明显。

3.2 SSI效应对隔震结构层间位移响应影响

结构的位移响应也是SSI作用的主要表现之一。

图8给出了Kobe波激振时两种地基上隔震结构层间位移变化对比,图中楼层号0代表隔震层。总体来看,基础隔震结构在刚性地基和柔性地基上的位移反应变化规律基本相同。从计算结果来看,SSI效应放大了隔震结构的位移反应,尤其是随着结构高宽比的增大和输入地震动的增强,SSI效应对结构隔震层位移的放大效应尤为突出。究其原因,SSI效应改变了柔性地基上隔震结构的动力特性,进一步延长了隔震结构的基本周期,共振效应

增大了隔震结构的地震反应,而隔震层因自身水平刚度较小导致其变形增长较为明显。为进一步探究SSI效应对隔震层位移的影响效果,表7给出了SSI效应对隔震结构隔震层位移的影响率,其影响率如式(2)所示:

$$\text{SSI影响率} = [(n - n')/n'] \times 100\% \quad (2)$$

式中, n 为不考虑SSI反应峰值; n' 为考虑SSI反应峰值。

从表7可以得出,SSI效应对隔震结构隔震层的位移反应影响是比较明显的,整体上SSI效应以增大隔震层位移反应为主,即考虑SSI影响对隔震结构隔震层的位移反应是不利的,随着结构高度增加,高宽比增大,SSI效应对隔震层位移反应的影响程度有着增加的趋势,最大影响率达到了16.44%;与此同时输入不同地震动时SSI影响率也存在着明显差异,高频振动特性的卧龙波作用下的SSI影响率明显高于中低频的Kobe波和什邡八角波,表明SSI效应对隔震结构位移反应的影响不仅仅与输入地震动峰值大小有关,还和输入地震动类型有关。

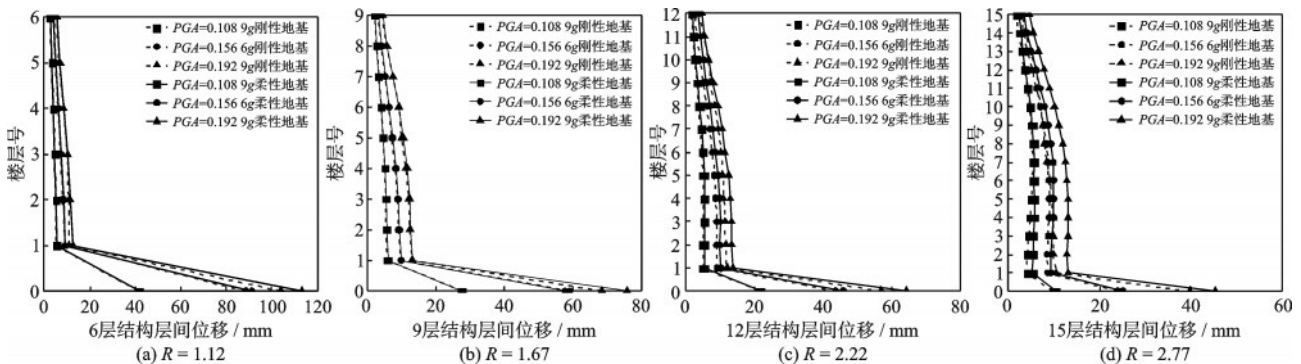


图8 Kobe波作用时隔震结构在不同地基上的层间位移反应

Fig.8 Inter-floor displacement responses of isolated structures on different foundations under Kobe wave

表7 隔震结构隔震层位移SSI影响率

Table 7 SSI influence rate of isolation layer displacement of isolated structures 单位: %

输入地震动	地震动大小 (PGA)/g	R=1.12	R=1.67	R=2.22	R=2.77
Kobe波	0.108 9	-1.34	1.67	-2.33	-6.75
	0.156 6	-3.08	2.55	-4.98	-7.59
	0.192 9	-8.09	-9.61	-11.41	-12.35
什邡八角波	0.141 1	-2.15	-5.55	-5.21	-6.84
	0.280 9	-4.19	1.61	-8.95	-10.79
	0.217 6	-9.52	-8.98	-10.82	-12.98
卧龙波	0.119 3	-4.56	-8.41	-7.83	-11.47
	0.176 6	-6.22	-9.92	-8.29	-11.89
	0.221 1	-10.09	-11.08	-12.97	-16.44

3.3 SSI效应对隔震结构隔震效率的影响

为研究SSI效应对隔震结构隔震效率的影响,图9~图12以Kobe波激励为例,给出了两种地基条件下四种高宽比隔震结构隔震效率的比较。隔震效率可用式(3)定义:

$$\text{隔震效率} = [(a - a')/a] \times 100\% \quad (3)$$

式中, a 是非隔震结构的楼层加速度峰值; a' 是隔震结构的楼层加速度峰值。

图中可以看出,由于SSI效应的影响,刚性地基和柔性地基上隔震结构体系的隔震效率有着明显的差异,不同高宽比隔震结构在刚性地基上的隔震效率都是高于柔性地基上的,即考虑SSI效应会降低隔震结构的隔震效率,并且随着输入地震动加速度峰值的增大,隔震效率降低的程度越明显。

当结构的高宽比较小, $R = 1.12、1.67$ 时,SSI效应对隔震结构不同楼层之间隔震效率的影响差别不大;随着高宽比逐渐增大, $R = 2.22、2.77$ 时,SSI效应对隔震结构中上部楼层隔震效率的影响明显大于中下部楼层,表明SSI效应在隔震结构上部有着一定放大作用,这可能会导致基于刚性地基设计的隔震体系在柔性地基条件下部分楼层的隔震效果不满足设计要求,因而在进行隔震结构设计时不可忽略SSI效应的影响。

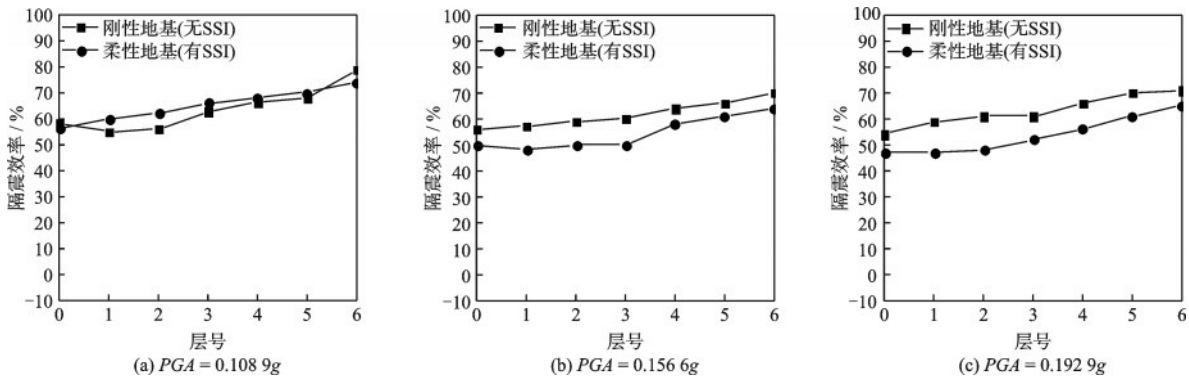


图9 高宽比 $R = 1.12$ 的隔震结构在不同地基上隔震效率比较

Fig.9 Comparison of isolation efficiency of isolation structures with an aspect ratio $R = 1.12$ on different foundations

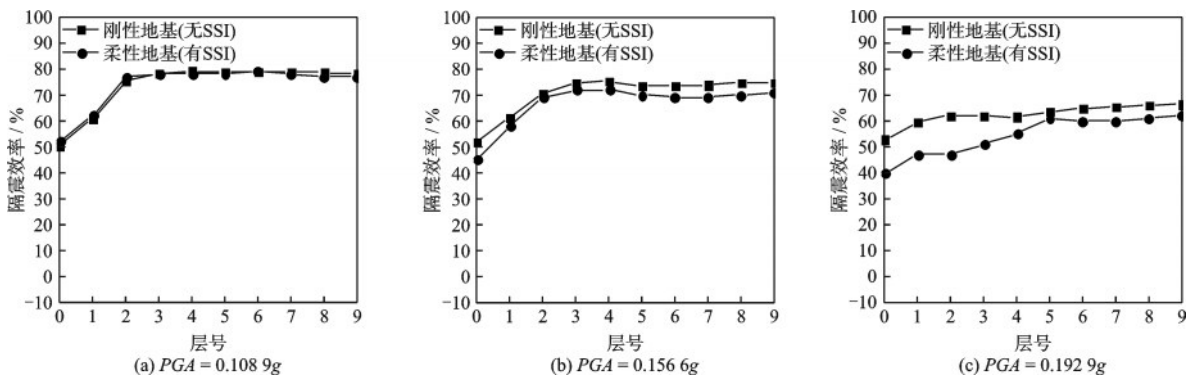


图10 高宽比 $R = 1.67$ 的隔震结构在不同地基上隔震效率比较

Fig.10 Comparison of isolation efficiency of isolation structures with an aspect ratio $R = 1.67$ on different foundations

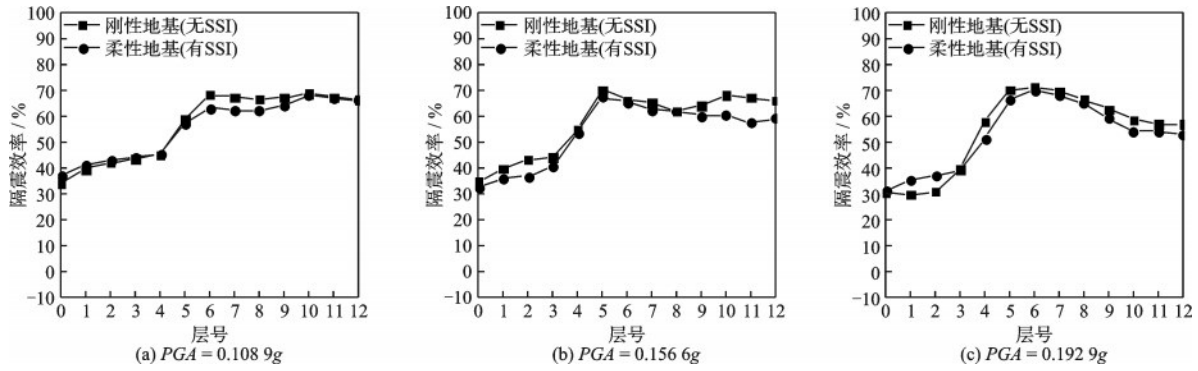


图 11 高宽比 $R = 2.22$ 的隔震结构在不同地基上隔震效率比较

Fig.11 Comparison of isolation efficiency of isolation structures with an aspect ratio $R = 2.22$ on different foundations

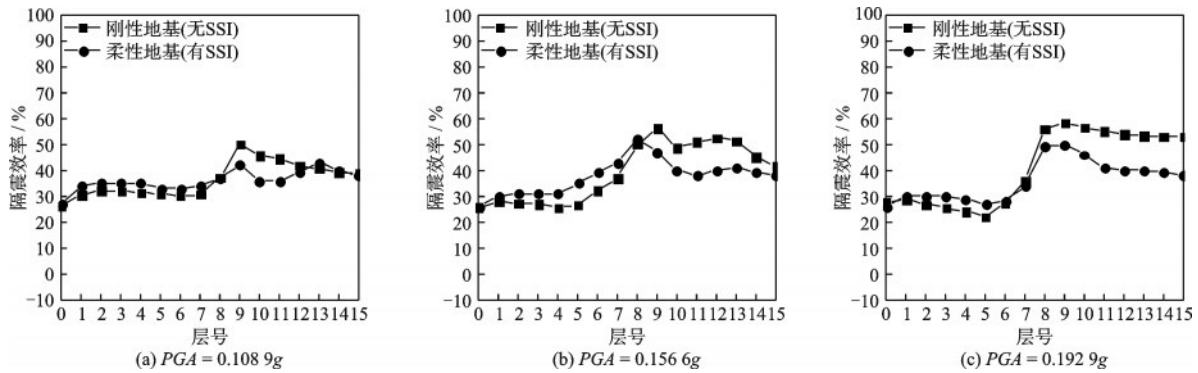


图 12 高宽比 $R = 2.77$ 的隔震结构在不同地基上隔震效率比较

Fig.12 Comparison of isolation efficiency of isolation structures with an aspect ratio $R = 2.77$ on different foundations

4 结 论

本文通过调整结构高宽比,分别建立柔性和刚性地基上基础隔震与非隔震结构的有限元计算模型,选取加楼层速度峰值和隔震层位移为量化指标,对比分析了四种不同高宽比的基础隔震结构与非隔震结构在两种地基条件下的地震反应规律及隔震效果,得出的主要结论如下:

(1)高宽比增加,隔震与非隔震结构楼层加速度反应峰值之比随之增大,各楼层的隔震效果降低,隔震效率最佳处由顶层逐渐向中层转移。

(2)基础隔震结构隔震层的位移随结构高宽比增大而减小;就不同的输入地震动而言,高频振动特性的卧龙波作用时结构位移反应明显小于中低频的 Kobe 波和什那八角波作用下的位移反应。

(3)SSI 效应会增大隔震结构的位移响应,降低隔震结构的隔震效率,并且随着结构高宽比的增大和输入地震动的增强,SSI 效应的对结构的影响程度在逐渐增加。

(4)随着高宽比逐渐增大,SSI 效应对隔震结构

中上部楼层隔震效率的影响明显大于中下部楼层,SSI 效应在隔震结构的上部有着一定放大作用。因此在进行隔震结构设计时,需要充分考虑 SSI 效应可能对结构地震反应产生的影响。

参考文献:

[1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[2] 谢礼立,马玉宏.基于抗震性态的设防标准研究[J].地震学报,2002,24(2):200-209.
Xie L L, Ma Y H. Study on fortification standards based on seismic behavior[J]. Journal of Seismology, 2002, 24(2): 200-209. (in Chinese)

[3] 于旭,朱超,庄海洋,等.不同场地多层基础隔震结构振动台试验对比研究[J].防灾减灾工程报,2016,36(5):758-765.
Yu X, Zhu C, Zhuang H Y, et al. Seismic responses of a base isolated multi-story structure with different soil foundations by the shaking table tests[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation, 2016, 36 (5) : 758-765. (in Chinese)

- [4] 李昌平,刘伟庆,王曙光,等.软土地基上高层隔震结构模型振动台试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(7):72-78.
Li C P, Liu W Q, Wang S G, et al. Shaking table test on high-rise isolated structure on soft soil foundation [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (7) : 72-78. (in Chinese)
- [5] 于旭,宰金珉,庄海洋.SSI效应对隔震结构地震效应的影响分析[J].南京航空航天大学学报,2011,43(6):846-851.
Yu X, Zai J M, Zhuang H Y. Shaking table model test on lead core rubber bearing in isolation structure system considering SSI [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43 (6) : 846-851. (in Chinese)
- [6] 赵畅,于旭,庄海洋,等.考虑SSI效应的基础隔震框架结构抗震性能水平分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(5):1024-1034.
Zhao C, Yu X, Zhuang H Y, et al. Horizontal analysis of seismic behavior of baseisolated frame structure considering SSI Effect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation, 2023, 43(5): 1024-1034. (in Chinese)
- [7] Takaoka E, Takenaka Y, Nimura A. Shaking table test and analysis method on ultimate behavior of slender ase-isolated structure supported by laminated rubber bearings [J]. Earthquake Engineering&Structural Dynamics, 2011, (40)5: 551-570.
- [8] 余文正,孙柏锋,张然,等.隔震结构高宽比及支座竖向力分析[J].土木工程与管理学报,2023,40(1):54-63.
Yu W Z, Sun B F, Zhang R, et al. Study on height-width ratio of isolated structure and vertical force of bearing [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2023, 40(1): 54-63. (in Chinese)
- [9] 冯绍林,黄囊云,马玉宏,等.不同高宽比高层隔震结构的地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2014(增1):788-794.
Feng S L, Huang X Y, Ma Y H, et al. Seismic response analysis of high-rise isolated structure to various height-to-width ratio [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014(Sup1): 788-794. (in Chinese)
- [10] 何文福,李雪,许浩,等.高层隔震结构提离摇摆耦合理论模型及振动台试验验证[J].土木工程学报,2020,53(3):19-27.
He W F, Li X, Xu H, et al. Theoretical model and verification of shaking table test for high-rise isolated structures coupling with uplifting and rocking [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 19-27. (in Chinese)
- [11] 刘伟庆,王曙光,林勇.宿州市人防指挥大楼隔震设计方法研究[J].建筑结构学报,2005,26(2):81-86.
Liu W Q, Wang S G, Lin Y. Research on the design method of base-isolated structure of Suqian Renfang Zhi-hui Building [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 81-86. (in Chinese)
- [12] 楼梦麟,王文剑,朱彤,等.土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):30-36.
Lou M L, Wang W J, Zhu T, et al. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system [J]. Earth Quake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 30-36. (in Chinese)
- [13] 庄海洋,吴祥祖,陈国兴.考虑初始静应力状态的土-地下结构非线性静、动力耦合作用研究[J].岩石力学与工程学报,2011(增1):3112-3119.
Zhuang H Y, Wu X Z, Chen G X. Study of nonlinear static and dynamic coupling interaction of soil-underground structure considering initial static stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011 (Sup1): 3112-3119. (in Chinese)
- [14] 庄海洋,陈国兴,朱定华.土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J].岩土工程学报,2006,28(10):1267-1272.
Zhuang H Y, Chen G X, Zhu D H. Dynamic visco-plastic memorial nested yield surface model of soil and its verification [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10) : 1267-1272. (in Chinese)
- [15] Zhuang H Y, Hu Zh H, Chen G X. Numerical modeling on the seismic responses of a large underground structure in soft ground [J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(2): 802 - 815.
- [16] 建筑隔震橡胶支座:JG/T118—2018 [S].北京:中国标准出版社,2018.
- [17] 于旭,朱超,庄海洋,等.软夹层场地隔震结构动力特性试验与数值计算对比分析[J].南京航空航天大学学报,2016,48(4):590-597.
Yu X, Zhu C, Zhuang H Y, et al. Result comparison between experiment and numerical simulation for base isolated structure on soil ground [J]. Journal of Nanjing university of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48 (4) : 590-597. (in Chinese)
- [18] 王栋,吕西林,刘中坡.不同高宽比基础隔震高层结构振动台试验研究及对比分析[J].振动与冲击,2015,34(16):109-118.
Wang D, Lyu X L, Liu Z P. Shaking table test and comparison analysis for base-isolated high-rise buildings with different aspect ratios [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 109-118. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)