

长周期地震动下考虑 SSI 效应三种地基 的层间隔震结构试验分析

吴应雄¹, 胡贤忠², 唐贞云³, 邱灿星³, 许燕芳⁴, 巫生华⁵, 吴炳添⁶, 章才富⁷

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350100;

3. 北京工业大学, 北京 100124; 4. 福建省森正建设集团有限公司, 福建 厦门 361000;

5. 至永建设集团有限公司, 福建 福州 350000; 6. 中城投集团第八工程局有限公司, 福建 厦门 361000;

7. 中建四海建设开发有限公司, 福建 厦门 361000)

摘 要: 长周期的远场类谐和地震动易使隔震结构地震响应强烈, 基于刚性地基假定设计的隔震结构在实际土层中减震效果良好, 但考虑土-结构相互作用 (SSI 效应) 后不能体现良好的减震效果。为此在已有刚性地基、软土地基和软夹层地基上大底盘单塔楼层间隔震结构的振动台试验结果的基础上进行对比分析, 探讨在远场类谐和地震动作用下三种地基上层间隔震结构动力响应及其减震性能的差异。结果表明: 在 SSI 效应作用下, 软土地基上非隔震、隔震结构的自振周期延长倍数较软夹层地基条件下略有增大; 不同类型地震动下, 软土、软夹层地基上隔震结构的加速度放大系数分布规律相似, 且考虑 SSI 效应后层间隔震结构的上、下子结构加速度响应均存在差异; 远场类谐和地震动下软夹层地基上隔震结构的位移响应应增大幅度较软土地基显著; 软土地基上层间隔震结构的基础转动角加速度略大于软夹层地基上的基础转动角加速度。

关键词: 远场类谐和地震动; 土-结构相互作用; 不同土性地基; 层间隔震; 振动台试验

中图分类号: TU352.12; TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2022)06-0143-06

Experimental Analysis of Story Isolated Structures Considering SSI Effect Under Long Period Ground Motions

WU Yingxiong¹, HU Xianzhong², TANG Zhenyun³, QIU Canxing³, XU Yanfang⁴

WU Shenghua⁵, WU Bingtian⁶, ZHANG Caifu⁷

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Academy of Architectural Sciences Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350100, China;

3. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

4. Fujian Senzheng Construction Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China;

5. Zhiyong Construction Group Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China;

6. The Eight Engineering Bureau Of China City Investment Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China;

7. Zhongjian Sihai Construction and Development Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract: Long period far-field quasi harmonic earthquake motion easily leads to strong seismic response of isolated structures. The isolated structure designed based on the rigid foundation assumption has a good damping effect in the actual soil layer, but the soil structure interaction (SSI effect) cannot reflect a good damping effect. Therefore, based on the shaking table test results of the existing isolated structures with large chassis and single tower on the rigid foundation, soft soil foundation and soft interlayer foundation, a comparative analysis is carried out to discuss the differ-

ences in dynamic response and seismic reduction performance of the three types of isolated structures under far-field harmonic ground motions. The results are as follows. Under the SSI effect, the natural period extension times of non-isolated and isolated structures on soft soil foundation are slightly larger than those on soft interlayer foundation. Under different types of ground motions, the distribution laws of acceleration amplification coefficients of isolated structures on soft soil and soft interlayer foundation are similar, and the acceleration responses of upper and lower structures of interlayer isolated structures are different after considering SSI effect. The displacement response of isolated structures on soft interlayer foundation under far-field quasi harmonic ground motions increases more significantly than that on soft soil foundation; The angular acceleration of the base rotation of the upper layer isolation structure on soft soil foundation is slightly greater than that on the soft interlayer foundation.

Keywords: far-field quasi harmonic ground motions; SSI effect; different soil foundations; interlayer isolation; shaking table test

大底盘上塔楼建筑中利用层间隔震技术可以通过消耗地震能量的方式缓解刚度突变处的复杂内力问题^[1]。远场类谐和地震动低频成分丰富、卓越周期较长且脉冲特性显著^[2],极易与自振周期较长的建筑结构产生共振反应。

当前大多数学者是基于刚性地基假定建立隔震结构理论分析和抗震设计,对土-结构动力相互作用效应(简称 SSI 效应)的考虑不充分^[3-4]。基于刚性地基假定设计的隔震结构在实际土层中减震效果良好,但考虑土-结构相互作用(SSI 效应)后减震效果不佳^[5]。Luco^[6]研究了隔震结构在基于 SSI 效应考虑后对结构动力特性产生的影响规律,指出 SSI 效应使结构位移和剪力比刚性地基下相对增大。于旭等^[7]、李昌平等^[8]开展了刚性、软土地基上基础隔震结构振动台试验研究,明确了随着软土地基上的结构体系阻尼增加,隔震结构在考虑 SSI 效应后其减震效果降低明显。许立英等^[9]开展了长周期地震动下刚性、软土地基上基础隔震结构双向振动台试验,结果表明,在远场类谐和地震动作用下 SSI 效应对隔震结构响应的影响更大,进行结构设计前应充分考虑 SSI 效应。

当前研究基本是围绕土-基础隔震结构而开展,针对层间隔震体系的研究较少;地基通常为刚性或者均匀土体,与实际情况不同,对软土地基与软夹层地基的研究较少;层间隔震结构在长周期地震动和 SSI 效应耦合下的研究报道更是少有。因此本文作者所在课题组在国家自然科学基金项目资助下开展了多个远场类谐和地震动下刚性、软土和软夹层地基上层间隔震结构振动台试验^[10-12],本文在此基础上对比分析远场类谐和地震动下三种不同地基上层间隔震结构的动力响应,为层间隔震结构技术应用提供具体试验依据与指导。

1 试验设计

1.1 模型相似关系与试验模型

参照课题组已有研究^[10-12],假定建筑所在区域场地类别为Ⅲ类,设防烈度为 8 度(0.2g)。图 1(a)为平面布置示意图。试验重点研究这类结构单向(X 向)的地震响应,参照文献[10-12]的简化原则对假定结构进行简化,图 1(b)是简化后的结构平面。

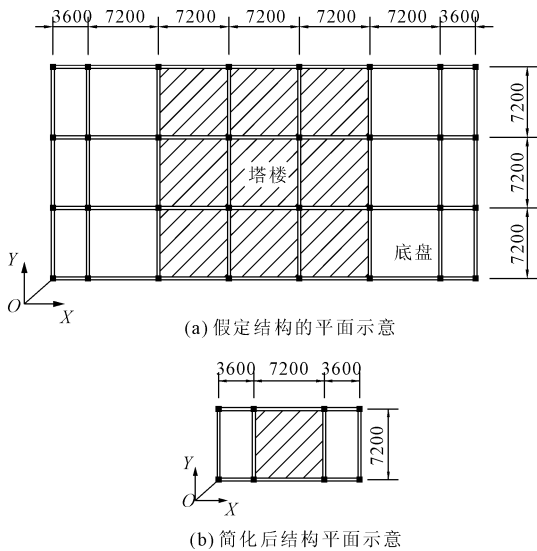


图 1 模型结构平面图

参照文献[10-12]相似比参数选取规则,综合考虑土体动力反应与隔震支座应力的相似,将加速度相似比、弹性模量相似比和长度相似比作为基本相似参数,模型结构其他物理量的相似比根据 Buckingham π 定理导出,时间相似比为 0.288,线位移与长度相似比均为 1/12。

图 2 是根据相似关系缩尺设计的简化结构示意图。具体试验模型制作参见文献[10-12]。

1.2 隔震支座

综合考虑国内相关试验成果选择直径 70 mm 的铅芯隔震支座(LRB70-5)。图 3 为隔震支座图,尺寸规格与力学性能参数见文献[10-12]。

1.3 土箱制作与土体制备

参照陈国兴等^[13]的研究成果,设计、制作的层状剪切型土箱平面尺寸为长 3.2 m(*X* 向),宽 2.0 m(*Y* 向),高 1.4 m(*Z* 向),其外观如图 4 所示。陈启东等^[14]通过试验证明该土箱可以有效消除边界效应。

试验通过将结构直接放置在振动台面模拟刚性地基条件;软土地基采用粉质黏土,土层高度取 1.2 m;软弱夹层地基共分为三层,自上而下分别为松散砂土(0.3 m)、高含水量黏土(0.4 m)以及饱和密实砂土(0.5 m),总厚度为 1.2 m。两种地基均采用人工分层装填方式,采用电动冲击夯夯实,使其成为桩基持力层^[10-12]。基础为群桩基础,设计尺寸及配筋参照文献[10-12]。

照文献[10-12],测点布置见图 6。



图 4 试验土箱

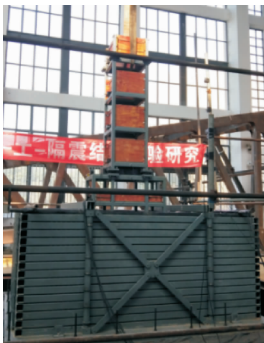


图 5 模型整体组装

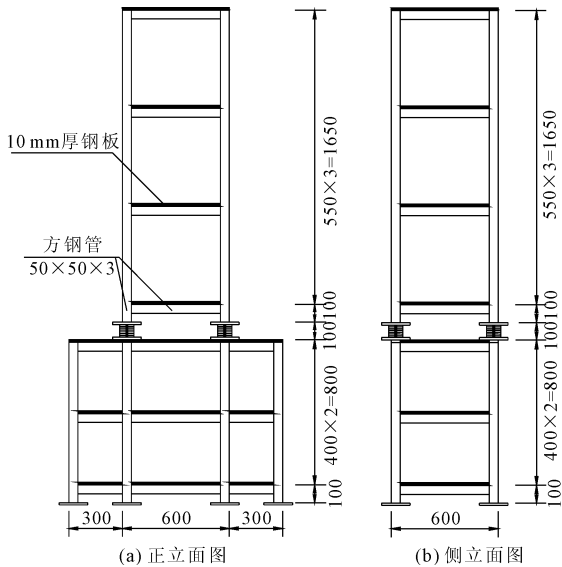


图 2 层间隔震结构模型构造及尺寸示意

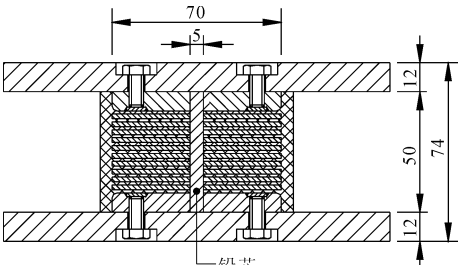


图 3 隔震支座

1.4 模型组装与测点布置

图 5 给出了模型的整体组装。传感器的选择参

1.5 地震动选择与试验工况

地震波从 PEER 数据库选取,选取三条普通地震动与三条远场类谐和地震动。选波规则参照文献[15],表 1 为选取的地震动类别与名称。

表 1 地震动类别与名称

类型	地震波
普通地震动	El Centro
	Taft
	TCU053E
远场类谐和地震动	ILA048N
	ILA056N
	ILA004N

试验顺序为刚性地基-层间隔震、刚性地基-抗震、软土地基-层间隔震、软土地基-抗震、软夹层地基-层间隔震、软夹层地基-抗震。设置试验的地震动峰值为 0.2*g*、0.4*g*;设置普通地震动的地震动峰值为 0.2*g*、0.4*g* 峰值进行加载,试验加载顺序以地震动峰值加速度从小到大进行。不同加速度峰值下层间隔震与抗震两种结构动力响应规律相似,限于篇幅,本文均以加速度峰值 0.2*g* 下两种结构试验结果为例分析普通、远场类谐和地震动下刚性、软土和软夹层地基的动力响应规律,试验工况见表 2。

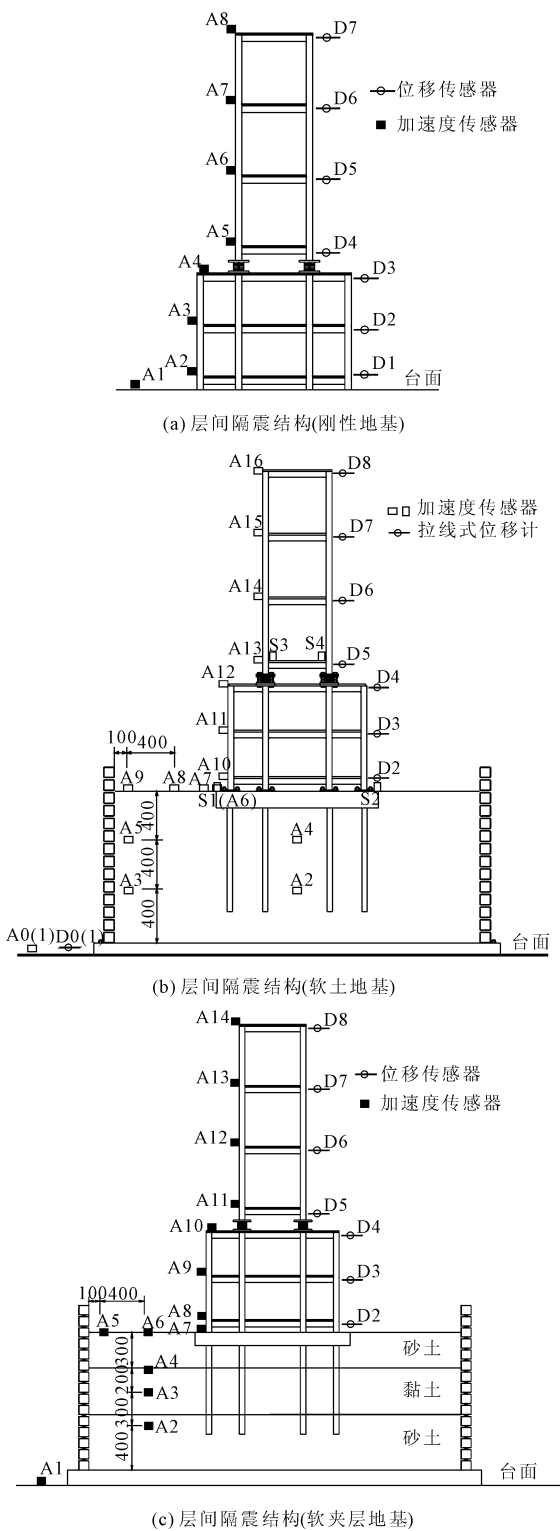


图 6 传感器测点布置图

2 试验结果及分析

2.1 试验宏观现象

刚性、软土和软夹层地基上的模型结构在试验中的宏观反应现象基本一致,即当振动台输入较小

加速度峰值地震动时,结构的位移反应较小,随着加速度峰值的增大,结构的反应增强,隔震结构的最大层间位移主要集中于隔震层,符合隔震结构的地震反应现象。其中,远场类谐和地震动作用下结构的位移反应明显较普通地震动作用强烈;软土和软夹层地基上的结构均发生一定程度的沉降和倾斜,但软夹层地基上的结构沉降量和倾斜度较小,可推断随着地基土变软,沉降和倾斜程度增大。

2.2 土-结构模型动力特性

三种地基上模型结构的自振周期对比见表 3。分析其结果知:(1) 层间隔震结构的自振周期较抗震结构大幅度延长,刚性地基上层间隔震结构自振周期试验值是抗震结构的 2.64 倍,软土地基上层间隔震结构自振周期试验值是抗震结构的 1.93 倍,软夹层地基上层间隔震结构自振周期试验值是抗震结构的 1.98 倍。说明考虑 SSI 效应后,隔震结构的自振周期延长倍数变低。(2) 软土和软夹层地基上的结构自振周期较刚性地基均有显著的延长,其中软土和软夹层地基上抗震结构的自振周期试验值分别延长 1.49 倍、1.37 倍,软土和软夹层地基上隔震结构的自振周期试验值分别延长 1.08 倍、1.03 倍,结果表明软土地基上抗震、隔震结构自振周期延长倍数较软夹层地基条件下略有增大。

2.3 土-结构地震响应

2.3.1 楼层加速度响应

普通、远场类谐和地震动下刚性、软土和软夹层地基的结构楼层加速度放大倍数对比如图 7 和图 8。

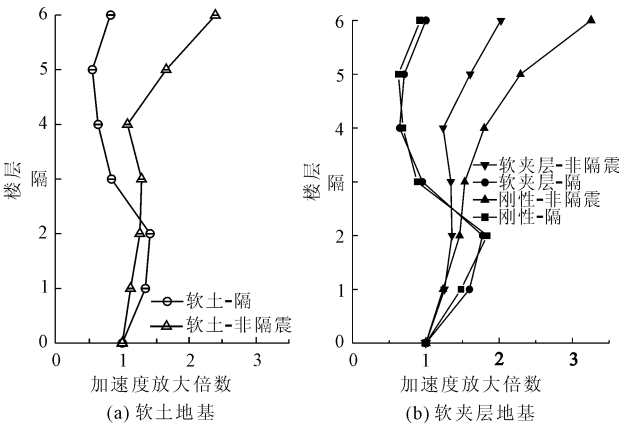


图 7 加速度放大系数(普通地震动)

(1) 在普通地震动作用下,软土地基上隔震结构的加速度放大系数分布规律与软夹层地基条件下相似,下部底盘加速度放大系数先增大后减小,上部

表 2 试验工况 (PGA = 0.2g)

地基类型	模型结构	地震动类型及工况					
		普通		远场类谐和			
		El Centro	Taft	TCU053E	ILA048N	ILA056N	ILA004N
刚性地基	层间隔震	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6
	抗震	TB1	TB2	TB3	TB4	TB5	TB6
软土地基	层间隔震	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6
	抗震	TD1	TD2	TD3	TD4	TD5	TD6
软夹层地基	层间隔震	TE1	TE2	TE3	TE4	TE5	TE6
	抗震	TF1	TF2	TF3	TF4	TF5	TF6

表 3 结构自振周期

状态	T_1/s					
	刚性-抗震	刚性-层间隔震	软土-抗震	软土-层间隔震	软夹层-抗震	软夹层-层间隔震
试验值	0.175	0.462	0.260	0.502	0.240	0.476

塔楼加速度放大系数先减小后增大。(2) 远场类谐和地震动作用下,软土、软夹层地基上隔震结构上部塔楼的加速度响应规律与普通地震动条件下相似,但加速度放大系数远大于普通地震动,减震效果较差。(3) 加速度峰值相同时,普通地震动下隔震结构下部底盘的加速度响应较远场类谐和地震动条件下大;而塔楼的加速度响应规律则相反。

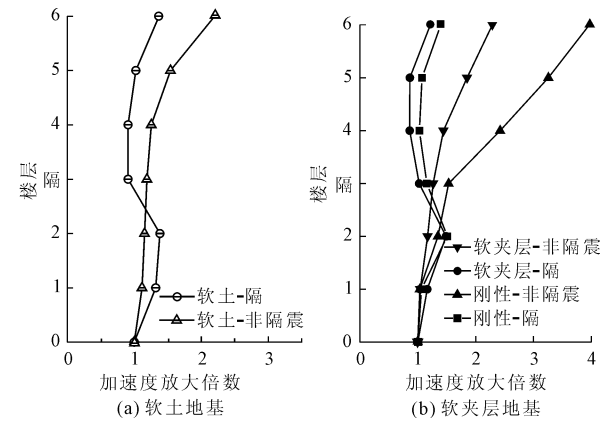


图 8 加速度放大系数 (远场类谐和地震动)

2.3.2 楼层位移响应

普通、远场类谐和地震动下刚性、软土和软夹层地基的结构楼层位移对比如图 9、图 10。

分析可知:(1) 隔震结构在软土、软夹层地基上楼层位移比刚性地基条件下增大显著,且软夹层地基上隔震结构楼层位移比软土地基大。分析可知,因土体非绝对刚性,在软弱地基上的桩基承台由于地震动的作用会发生转动与平动,进而使上部结构的整体水平位移由转动、平动与自身变形综合。

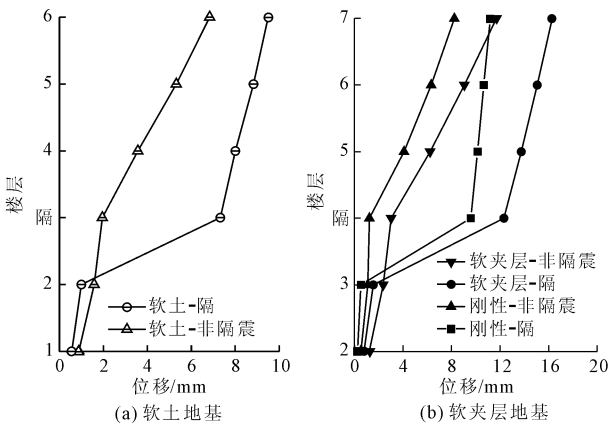


图 9 楼层位移 (普通地震动)

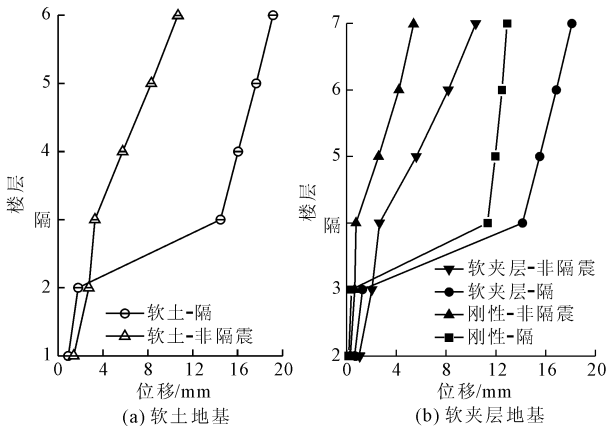


图 10 楼层位移 (远场类谐和地震动)

(2) 远场类谐和地震动下隔震结构的位移响应远大于普通地震动作用,且软夹层地基上隔震结构在远场类谐和地震动下的位移响应增大幅度较软土地基显著。其中 0.2g 远场类谐和地震动下软土地基上隔震结构的隔震层位移约为普通地震动下的 1.87 倍,0.2g 远场类谐和地震动下软夹层地基上隔震结构的隔震层位移约为普通地震动下的 2.86 倍。

加速度峰值 0.2g 时的层间位移减震率和 SSI 效应放大系数见表 4 (注:减震率 = (非隔震模型响应 - 隔震模型响应)/非隔震模型响应)。

表 4 层间位移减震率对比 单位:%

楼层	普通地震动			远场类谐和		
	刚性	软夹层地基	软土地基	刚性	软夹层地基	软土地基
5	69.60	57.49	55.92	64.86	43.04	36.97
4	73.17	58.32	53.14	67.05	47.90	36.47
3	76.33	62.78	57.41	65.86	53.50	36.69
隔	—	—	—	—	—	—
2	47.72	37.72	38.03	42.74	38.65	35.56
1	49.51	39.51	36.36	38.51	35.44	34.78

由表 4 可知,考虑 SSI 效应后,普通地震动下软土、软夹层地基上隔震结构层间位移减震率相差不大,但远场类谐和地震动下软夹层地基上隔震结构上部塔楼层间位移减震率较软土地基下降显著。普通地震动下软夹层地基的塔楼减震率为 57.49%~62.78%,软土地基条件下为 53.14%~57.41%;而远场类谐和地震动下软夹层地基的塔楼减震率为 43.04%~53.50%,软土地基条件下为 36.47%~36.97%。对于下部底盘,在不同地震动下,均具有一定的减震效果,软土、软夹层地基考虑 SSI 效应后层间隔震结构下部结构位移减震效果类似。

2.3.3 基础转动效应

不同地基上层间隔震结构的基础转动角加速度存在明显差异:(1)刚性地基条件下层间隔震结构的基础转动角加速度峰值为 0.0038 rad/s²~0.0102 rad/s²,对上部结构的影响基本可以忽略不计,软土地基条件下为 0.618 rad/s²~2.048 rad/s²,软夹层地基条件下为 0.583 rad/s²~1.403 rad/s²,软土、软夹层地基条件下层间隔震结构的基础转动角加速度较刚性地基条件下均增大显著,转动效应明显,且软土地基条件下层间隔震结构的基础转动角加速度是软夹层条件下的 1.06 倍~1.46 倍。(2)当 PGA 为 0.2g 时,远场类谐和地震动下层间隔震结构基础的转动角加速度较普通地震动下增大效果并不显著,随着峰值增大,远场类谐和地震动对基础转动效应的影响较为明显,转动效应增强。

3 结 论

(1) 在 SSI 效应作用下,软土地基上非隔震、隔震结构的自振周期延长倍数较软夹层地基条件下略有增大。软土、软夹层地基上非隔震结构的自振周期试验值较刚性地基条件下分别延长 1.49 倍、1.37 倍,软土、软夹层地基上隔震结构的自振周期试验值较刚性地基条件下分别延长 1.08 倍、1.03 倍。

(2) 不同类型地震动下,软土、软夹层地基上隔

震结构的加速度放大系数分布规律相似,且层间隔震结构的塔楼与底盘在考虑 SSI 效应后的加速度响应均存在一定差异。考虑 SSI 效应后层间隔震结构的上部塔楼加速度响应显著减小,但减震效果随加速度峰值增加而降低;普通地震动作用下,底盘的加速度响应较远场类谐和地震动条件下大,而塔楼的加速度响应规律则相反。

(3) 远场类谐和地震动下软夹层地基上隔震结构的位移响应增大幅度较软土地基显著。0.2g 远场类谐和地震动下软土地基上隔震结构的隔震层位移约为普通地震动下的 1.87 倍,0.2g 远场类谐和地震动下软夹层地基上隔震结构的隔震层位移约为普通地震动下的 2.86 倍。

(4) 软土层地基上层间隔震结构的基础转动角加速度略大于软夹层地基上的基础转动角加速度。软土地基条件上层间隔震结构的基础转动角加速度为 0.618 rad/s²~2.048 rad/s²,软夹层地基上为 0.583 rad/s²~1.403 rad/s²,软土地基上层间隔震结构的基础转动角加速度是软夹层条件下的 1.06 倍~1.46 倍。

综上所述,长周期地震动作用下软土地基上层间隔震结构的自振周期、楼层峰值加速度和基础转角加速度与软夹层地基条件下相差不大,但软夹层地基条件上层间隔震结构的楼层位移较软土地基增大显著,减震效果较差。

参考文献:

[1] 谭 平,周 云,周福霖,等. 大底盘多塔楼结构的混合隔震控制[J]. 世界地震工程,2007,23(2):12-19.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Zhan Z P, Chen Q J, Zhang R F, et al. Optimal design of an inerter isolation system considering the soil condition[J]. Engineering Structures, 2019,196:109324.

[5] Luco J E, Wong H L. Seismic response of foundations embedded in a layered half-space[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1987,15(2):233-247.

[6] Luco J E. Effects of soil-structure interaction on seismic base isolation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014,66:167-177.

[7] 于 旭,宰金珉,王志华. 考虑 SSI 效应的铅芯橡胶支座隔震结构体系振动台模型试验[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(6):786-792.

板加固后承载能力提高更明显,但相应的延性会有所降低。

参考文献:

[1] 福州市勘测院平潭分院. 2017 年平潭综合实验区石头厝普查成果[R]. 平潭:福州市勘测院平潭分院, 2017.

[2] 刘木忠. 料石墙体的抗剪强度[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 1985, 6(1): 36-40.

[3] 清华大学土木工程结构专家组, 西南交通大学土木工程结构专家组, 北京交通大学土木工程结构专家组, 叶列平, 陆新征. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008(4): 1-9.

[4] 李碧雄, 谢和平, 王 哲, 等. 汶川地震后多层砌体结构震害调查及分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(4): 19-25.

[5] 高永昭, 吴 体, 肖承波, 等. 四川农村房屋震害特征及抗震能力分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3): 136-140.

[6] 国家标准《建筑抗震设计规范》(2016 年版)局部修订通过审查[J]. 工程建设标准化, 2022(4): 23.

[6] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国

建筑工业出版社, 2010.

[7] 砌体结构加固设计规范: GB 50702—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[8] 杜永峰, 李 慧, 葛 静. 石砌文物墙体的抗震性能及加固技术研究[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 8-11

[9] 胡奕东, 郭子雄, 柴振岭, 等. 嵌缝加固条石砌筑石墙的抗震性能初探[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(6): 24-28.

[10] 张广泰, 侍克斌, 李元吉. 后植筋加固砖墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5): 145-150.

[11] 葛 静. 石砌体结构抗震性能与加固技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.

[12] 刘文定. “夹板墙”加固干砌甩浆石墙抗震性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.

[13] 刘建生, 安学军, 苏 跃. 石砌体的本构关系[J]. 建筑结构, 1995(10): 28-33.

[14] 施楚贤, 徐 健, 刘桂秋. 砌体结构设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

[15] 郭俊杰. 足尺混凝土小型空心砌块墙体抗震性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2005



(上接第 148 页)

[8] 李昌平, 刘伟庆, 王曙光, 等. 软土地基上高层间隔震震结构模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7): 72-78.

[9] 许立英, 吴应雄, 田 泓. 长周期地震动下软土地基的偏心基础隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8): 1-11.

[10] 方泓杰, 董昕珺, 许立英, 等. 长周期地震动下软夹层地基的复合层间隔震结构试验研究[J/OL]. 工程抗震与加固改造, 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5260.p.20220228.1400.002.html>

[11] 吴应雄, 林友勤. 远场长周期地震作用下桩-土-层间隔震结构体系的响应特征与失效控制[J]. 水利与建

筑工程学报, 2022, 20(4): 1-8.

[12] 吴应雄, 郑泽炜, 颜桂云, 等. 远场长周期地震动下桩-土-层间隔震结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 11-22.

[13] 陈国兴, 王志华, 左 熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 89-97.

[14] 陈启冬, 许立英, 刘 阳, 等. 不同土性地基考虑 SSI 效应的隔震结构地震响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 149-154, 214.

[15] 许立英, 刘 宁, 吴应雄. 基于抗震分析的长周期地震动的界定与选取[J]. 地震研究, 2019, 42(4): 569-578, 651.