

长周期地震动下软夹层地基的层间隔震结构 振动台试验研究

吴应雄¹, 陈劲杨¹, 方泓杰¹, 施建日², 许立英³

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省建筑设计研究院有限公司, 福建 福州 350001;
3. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 长周期地震动易使隔震结构地震响应强烈, 考虑土-结构相互作用 (SSI 效应) 后隔震结构可能更不利。为探究长周期地震动下软弱夹层地基 SSI 效应对层间隔震结构的动力响应规律及减震性能的影响, 开展刚性、软夹层地基上大底盘单塔楼层间隔震结构的数值模拟和振动台试验。结果表明: 考虑 SSI 效应后结构的自振周期较刚性地基增大, 但采用隔震技术后延长的周期倍数降低; 软夹层地基对输入地震动具有明显放大和滤波效应, 与地震动的峰值和频谱特性相关; SSI 效应对层间隔震结构的地震响应以放大作用为主, 对下部底盘和隔震层的影响较大; 考虑 SSI 效应后长周期地震动下隔震结构的地震响应较普通地震动更为强烈, 减震效果变差, 特别是近场脉冲地震动下隔震层位移超限, 体系发生失效破坏。

关键词: 长周期地震动; 层间隔震; SSI 效应; 软夹层地基; 振动台试验

中图分类号: TU352.12; TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)02-0345-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.006

引言

大底盘上塔楼建筑具有竖向不规则的特征, 采用层间隔震技术在结构突变处设置隔震层, 消耗地震能量以改善刚度突变处的复杂内力问题^[1]。长周期地震动具有丰富的低频成分, 较长的卓越周期以及显著的脉冲特性等特点^[2], 与自振周期较长的隔震结构易产生共振, 引起的动力反应与普通地震动下明显不同。

Ariga 等^[3]研究普通地震动和长周期地震动下高层基础隔震结构的地震响应, 指出长周期地震动与隔震结构共振效应明显, 在结构设计时要引入长周期地震动。王亚楠等^[4]研究远场长周期地震动下基础隔震结构的响应特点和损伤分布规律, 指出同峰值作用下长周期地震动对隔震结构危害更大。杜晓磊等^[5]对某基础隔震结构输入相同地震的近场及远场地震动激励, 对比分析两类地震动下的地震响应, 结果表明近场脉冲地震动对隔震结构的影响较远场地震动强烈, 隔震层位移超限, 导致上部结构倒塌, 结构设计中应关注近场脉冲地震动的影响。

目前隔震结构的理论分析和抗震设计大多建立在刚性地基假定上, 忽略 SSI 效应的影响^[6]。对于建立在软弱地基上的结构, 地基土将改变输入地震波的动力特性, 增大结构体系阻尼, 使基底产生一定的摇摆运动。此时, 基于刚性假定下设计的隔震结构可能无法体现出应有的减震效果, 导致计算结果偏不安全。Luco^[7]研究了 SSI 效应对隔震结构动力特性的影响规律, 指出考虑 SSI 效应后, 结构位移、剪力较刚性地基情况增大, 隔震设计中应重视 SSI 效应的影响。于旭等^[8]和李昌平等^[9]进行刚性地基和软土地基上基础隔震结构的振动台试验研究, 指出软土地基上结构体系的阻尼增加, 考虑 SSI 效应后隔震结构的减震效果显著降低。Zhuang 等^[10-11]开展不同土性地基上基础隔震结构试验, 研究发现不同地基上 SSI 效应对隔震结构的地震反应影响不同, 软夹层地基上 SSI 效应可能增大或减小上部结构的地震反应。吴应雄等^[12]对均匀软土地基上层间隔震结构进行振动台试验研究, 指出考虑 SSI 效应后隔震结构自振周期延长, 远场长周期地震动下结构响应较普通地震动更强烈。

收稿日期: 2021-12-14; **修订日期:** 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51778149); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务专项资助项目 (2021D03); 福建省建设科技研究开发项目 (2020, 2022)。

综上可知,SSI效应导致结构自振周期延长,对于Ⅲ和Ⅳ场地,长周期结构需考虑长周期地震动的影响^[13]。现有研究以土-基础隔震结构为主,少有针对性对层间隔震体系;地基土多为均匀土体,而实际土体各层土质均存在一定差异,对软弱夹层地基的研究偏少;长周期地震动与SSI效应耦合的层间隔震结构研究更是鲜有报道。为此,以某典型大底盘单塔楼结构为研究对象,通过振动台试验和数值模拟,对长周期地震动下软夹层地基上层间隔震结构的地震反应及减震性能展开研究。

1 试验设计

1.1 模型相似关系

延续本文作者课题组土-隔震结构试验研究^[14],原型建筑平面示意图如图1(a)所示。建筑物为钢筋混凝土高层框架结构,设定所在区域设防烈度8度(0.2g),场地类别Ⅲ类,地震分组第二组。底盘2层,层高4.8 m;塔楼6层,层高3.3 m,建筑总高度为29.4 m。塔楼与大底盘平面面积比为1:2,塔楼高宽比为1:2.75(X向),符合大底盘高层结构的受力特征。

试验重点考察结构X向的动力特性和地震响应,综合振动台设备条件,对原型结构进行一定简化,如图1(b)所示。

考虑SSI效应的振动台试验涉及到多种材料,要使缩尺模型的试验参数与原型参数完全满足相似关系十分困难。根据研究目的,要求土-隔震结

构体系主要参数的相似比统一,次要参数相似比尽量接近。综合振动台设备条件和材料特性等因素,考虑隔震支座应力和土体动力反应相似,根据支座的应力相似比由隔震支座控制的原则,将支座应力相似比定为1。选取加速度、长度、支座应力相似比为基本相似参数。依照 Buckingham π 定理推算出其他物理量的相似常数,如表1所示。

表 1 模型相似常数
Tab. 1 Similarity constant of model

类型	物理量	相似关系	相似比	
			结构	地基土
几何性能	长度 l	S_l	1/12	1/12
	线位移 x	$S_x=S_l$	1/12	1/12
材料性能	弹性模量 E	S_E	1	1/4
	上部结构密度 ρ	S_ρ	12	1
	上部结构质量 m	$S_m=S_\rho S_l^3$	1/144	1/1728
	支座应力 σ	S_σ	1	-
	土体剪切模量 G	S_G	-	1/4
动力性能	刚度 k	$S_k=S_E S_l$	1/12	-
	时间 t	$S_t=S_l^{0.5} S_a^{-0.5}$	0.288	0.288
	加速度 a	S_a	1	1
	频率 f	$S_f=1/S_t$	3.472	3.472

1.2 试验模型设计与制作

根据上述相似关系,对简化结构进行缩尺设计。模型梁和柱采用强度为Q235的空心方钢管,截面尺寸为50 mm×50 mm×3 mm。底盘2层,层高为400 mm,X向为3跨,跨度为300,600和300 mm;考虑到地震作用下上部塔楼表现为平动特征^[1,4],将6层塔楼简化为3层,层高为550 mm;塔楼平面尺寸横、纵向均为单跨550 mm;每层楼板采用厚10 mm的钢板。

模型塔楼与底盘分开制作,模型整体由梁、柱及楼板焊接固接组成;塔楼与底盘通过预焊钢板直接螺栓连接形成抗震模型,在预焊钢板间设置隔震支座形成层间隔震模型。试验模型激振方向为结构横向(X向),模型结构设计如图2所示。钢框架模型重量为0.5 t,通过质量相似比换算,每层需增加配重0.4 t,模型总重量约为3.3 t。

模型基础采用4×2群桩基础,承台和方形桩采用C30混凝土浇筑,桩长径比为16。考虑到承台面积较大,土体与承台难以紧密贴合,以及为便于对承台下土体进行夯实和埋设传感器,故在承台表面预留350 mm×350 mm的孔洞,开孔后承台面积更接近工程实际且不影响基础的承载能力。承台和桩基设计大样如图3所示。

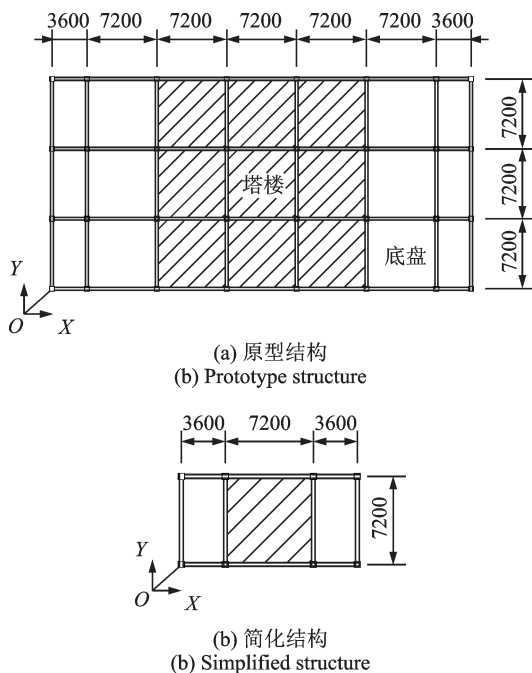


图 1 结构平面图(单位:mm)
Fig. 1 Plan of prototype structure(Unit: mm)

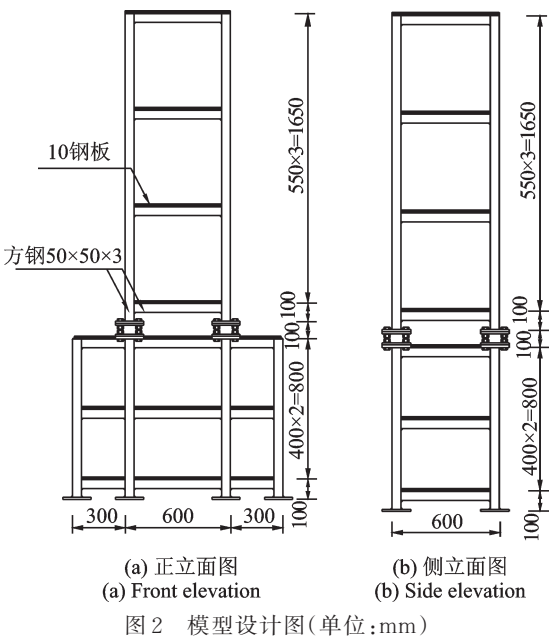
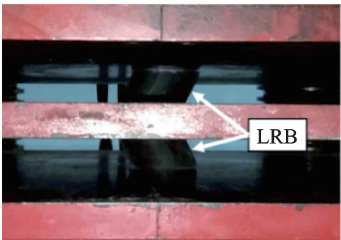
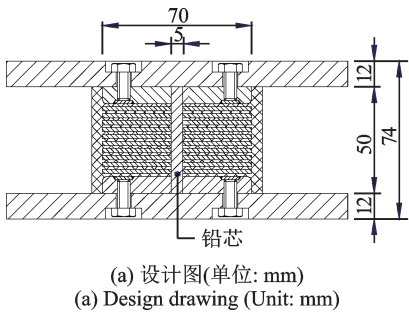


图 2 模型设计图(单位:mm)

1.3 试验用减隔震装置

基于目前生产工艺条件,按照表 1 所示的相似比来设计隔震支座是非常困难的。综合考虑国内外相关试验成果、竖向面压及生产工艺等条件^[12,15],确定支座直径为 70 mm (LRB70-5), 竖向面压约为 1.32 MPa。委托生产制作 8 个支座,如图 4(a)~(b)所示。为验证支座的力学性能,在试验前采用压剪试验



(c) 压剪测试
(c) Compression shear test

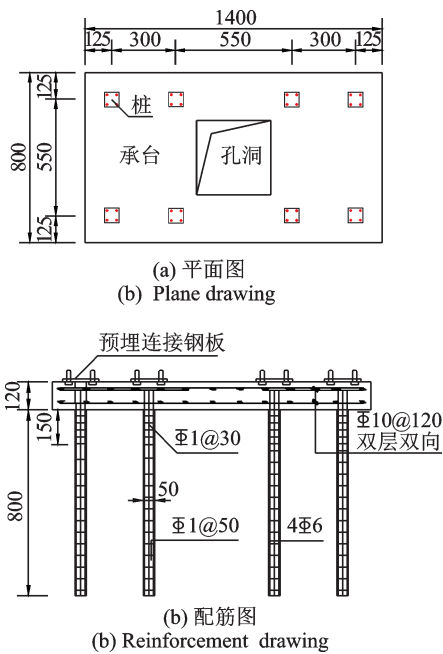


图 3 承台和桩基设计图(单位:mm)
Fig. 3 Design drawing of pile cap and pile foundation (Unit: mm)

机对支座进行 50%,100% 剪应变条件下水平性能试验。两个橡胶支座被视为一组,放置在剪切板的上方和下方,如图 4(c)所示。由压剪测试得到的滞回曲线如图 4(d)所示。选择力学性能相近的 4 个支座安装于隔震层,支座规格和力学参数如表 2 所示。



(b) 实物图
(b) Picture of real products

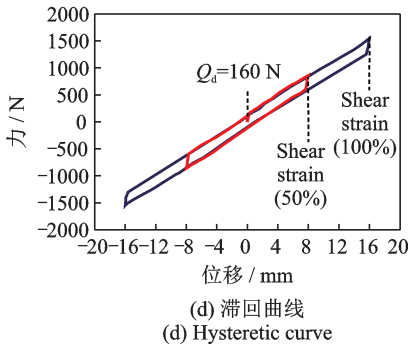


图 4 隔震支座
Fig. 4 Isolated bearing

表 2 隔震支座参数

Tab. 2 Specifications of isolation bearings

型号	剪切模量/ MPa	内部橡胶层 厚度	内部钢板厚度	屈服前刚度/ (N·mm ⁻¹)	屈服后刚度/ (N·mm ⁻¹)	屈服 力/N	水平刚度/(N·mm ⁻¹)	
							γ=50%	γ=100%
LRB70	0.392	1.6 mm×10 层	2 mm×9 层	1071	89	160	103	91

1.4 试验土箱与土体制作

试验采用本课题组研制的层状剪切型土箱,已被证明可以有效减少边界效应,满足试验要求^[12]。土箱净尺寸为 3.2 m(X向)×2 m(Y向)×1.4 m(Z向),为减少填土和水渗漏,箱体内部贴一层 20 mm 厚橡胶袋,同时放置 60mm 厚轻质泡沫板以减少边界效应。箱体由 15 层矩形钢框架叠合组成,每个框架由 4 根 80 mm×80 mm×3 mm 方钢管焊接而成。相邻钢框架之间放置若干牛眼轴承,轴承内嵌置滚珠,可实现框架沿平面外任意方向转动。试验土箱如图 5 所示。

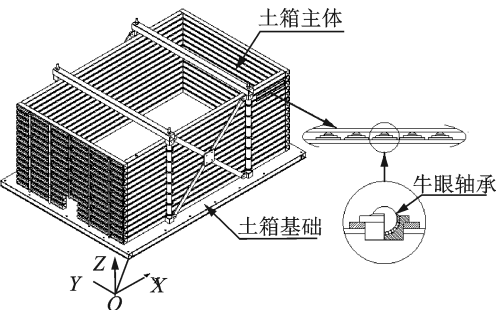


图 5 试验土箱
Fig. 5 Test soil container

模型地基为软弱夹层地基,总厚度为 1.2 m。地基分为三层,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)。模型地基制备主要控制密实度和含水率,采用人工分层进行装填。将模型地基土分为 12 层(每层为 0.1 m),装填每层土体后缓慢加水调制,保证地基水分均匀。静止 3 日后,取样进行土工试验,达到要求后用光滑的木板将土表面扫平,再进行下一层土体装填。填土过程中,将桩基承台固定在土箱内的预设位置,通过电动冲击夯进行夯实,保证桩间土体能够夯填密实。土层顶部则从承台底面预留的孔洞进行充填土并细致夯实,使得土层与承台底面贴合紧密。表 3 给出土样物理参数,采用 SDMT 波速检测仪测得软弱夹层地基的平均剪切波速约为 100 m/s,符合软弱地基的试验要求。相关试验过程如图 6,7 所示。

表 3 土样物理参数

Tab. 3 Physical property index of soil sample			
土样类型	厚度/m	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率 ω / %
砂土	0.3	1760	8.54
黏土	0.4	1800	36.28
砂土	0.5	1910	24.71



(a) 黏土
(a) Clay



(b) 砂土
(b) Sandy soil

图 6 试验土样
Fig.6 Test soil sample



图 7 土体夯实
Fig.7 Soil compaction

1.5 测点布置与模型组装

对塔楼、隔震层、底盘、承台、土箱及振动台进行组装连接,两种地基上模型组装后全貌如图 8 所示。振动台试验重点研究软夹层地基条件下 SSI效应对上部结构的动力特性及地震反应的影响。主要采集数据为:楼层加速度、楼层位移、承台表面水平加速度、地基土内及土表水平加速度。选择 DH610 型加速度传感器和 BL80-V 型拉线位移计进行测量,传感器测点布置如图 9 所示。

1.6 地震动选择与试验工况

从 PEER 数据库选取普通地震动和长周期地震动。选取地震动标准如下^[14]:(1)地震动断层距小于 20 km,且 5% 阻尼比的加速度反应谱平均周期 T_r 值大于 2 s 的地震动为近场脉冲地震动;(2)地震动断层距大于 60 km,且 T_r 值大于 2 s 的地震动为远场类谐和地震动;(3) PGV/PGA 小于 0.2 的地震动为普通地震动;(4)选择主震记录。为保证研究结果具有典型性,分别选取三类地震动各 3 条,如表 4 所示。

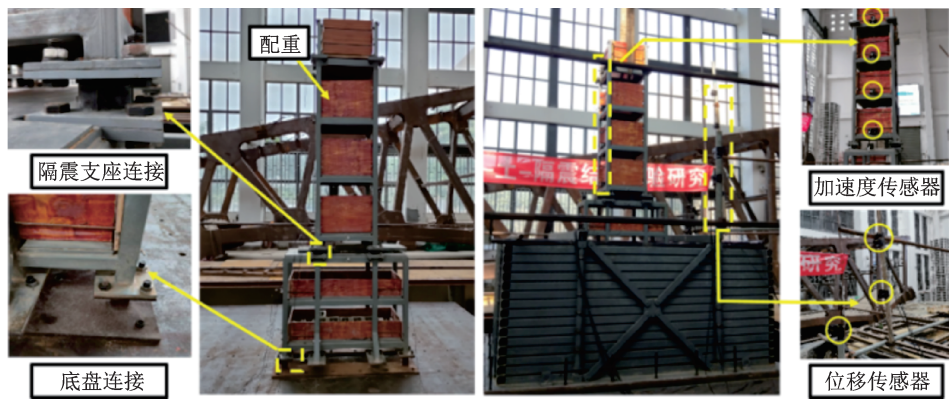


图 8 模型组装

Fig. 8 Assemble of the model

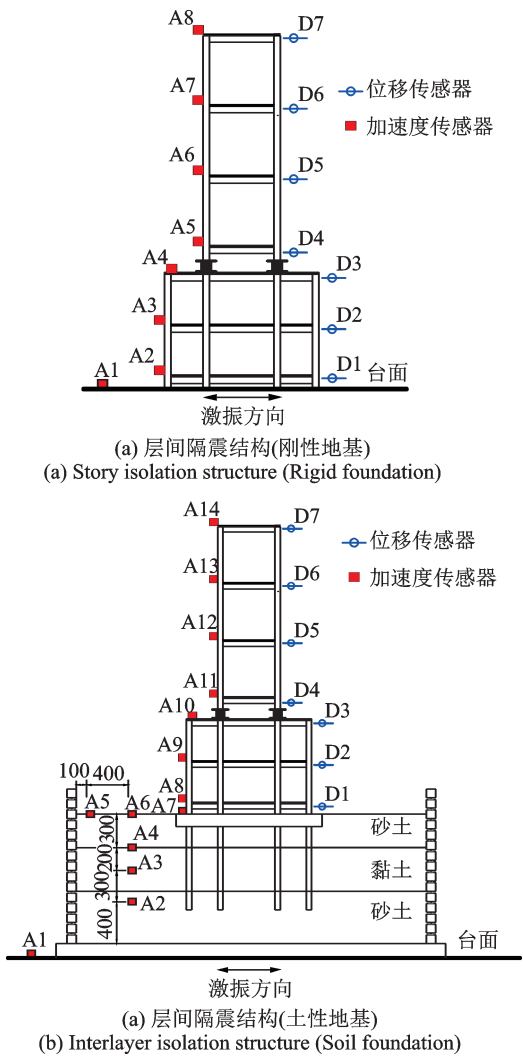


图 9 传感器测点布置(单位:mm)

Fig. 9 Layout of sensor measuring points(Unit: mm)

考虑到试验的安全,同时为了方便试验进行,试验模型顺序依次为刚性-层间隔震、刚性-抗震、土性-层间隔震、土性-抗震。地震动采用单向(X向)输入,普通地震动和近场脉冲地震动均按照0.1g,0.2g和0.4g的峰值进行加载,分别对应8度多遇、设防以及罕遇地震。

考虑到远场类谐和地震动加速度峰值普遍较小^[2],故将峰值设为0.1g和0.2g。在每条地震波输入前,均进行白噪声扫频,以测量模型的自振频率等

表 4 地震波参数

Tab. 4 Parameters of seismic waves

地震动类型	序号	地震波	震级	断层距/km	PGA/ g	PGV/ PGA	Tr/s
普通	1	El-Centro	6.95	6.09	0.348	0.11	0.76
	2	Taft	7.36	38.42	0.156	0.12	0.74
	3	TCU053E	7.6	5.95	0.230	0.18	1.06
近场脉冲	1	TCU036E	7.6	19.83	0.14	0.43	2.89
	2	TCU063E	7.6	9.78	0.18	0.24	2.25
	3	TCU102E	7.6	1.49	0.30	0.31	2.04
远场类谐和	1	ILA004N	7.6	88.89	0.06	0.41	3.07
	2	ILA055N	7.6	90.30	0.07	0.35	3.18
	3	ILA056N	7.6	92.04	0.07	0.48	3.70

动力特性参数。地震波持时根据时间相似比进行压缩。试验工况如表 5 所示。

表 5 试验工况

Tab. 5 Working conditions of test

地基类型	模型结构	PGA/ g	地震动类型及工况		
			普通	近场脉冲	远场类谐和
刚性地基	层间隔震	0.1	A1	A2	A3
		0.2	A4	A5	A6
		0.4	A7	A8	-
	抗震	0.1	B1	B2	B3
		0.2	B4	B5	B6
		0.4	B7	B8	-
软夹层地基	层间隔震	0.1	C1	C2	C3
		0.2	C4	C5	C6
		0.4	C7	C8	-
	抗震	0.1	D1	D2	D3
		0.2	D4	D5	D6
		0.4	D7	D8	-

1.7 数值模型建立

采用 ABAQUS 对缩尺模型进行建模:模型为 5 层钢框架,框架梁与柱均采用三维线(wire)部件模

拟,截面采用允许剪切变形的B31单元,并赋予与梁柱对应的截面尺寸和属性;楼板采用三维壳(shell)部件进行简化模拟,将配重质量转化为板的密度并施加到楼板属性;隔震支座用ABAQUS中的 Cartesian connector单元和 Align 旋转连接单元模拟。

桩基承台与土体均采用C3D8R实体单元建立。土体采用Mohr-Coulomb本构进行非线性模拟,地基土参数结合试验实测数据,同时进行合理调整以减小试验结果和数值模拟的误差,最终确定地基土本构参数如表6所示。桩基和承台采用混凝土损伤本构模型,钢筋嵌入承台和桩基中,桩基和承台与土体之间采用法向“硬接触”,切向接触采用库伦摩擦模型;上部结构与承台表面接触点设置绑定约束。地基土四周边界设置三维等效黏弹性单元^[16],通过刚度等效原则,推导出边界单元的等效剪切模量和等效弹性模量。地震波沿底部激振方向以加速度方式输入。刚性地基情况为移除土层,设置柱底沿激振方向自由,其余方向施加固定约束。土性地基上层间隔震结构三有限元模型如图10所示。

表 6 地基土本构参数

Tab. 6 Constitutive parameters of foundation soil

土层	厚度/ m	弹性模 量/MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	内摩擦 角/(°)	粘聚力/ MPa
砂土	0.3	25	1760	0.3	26	0.001
黏土	0.4	10	1800	0.4	15	0.015
砂土	0.5	60	1910	0.3	31	0.001

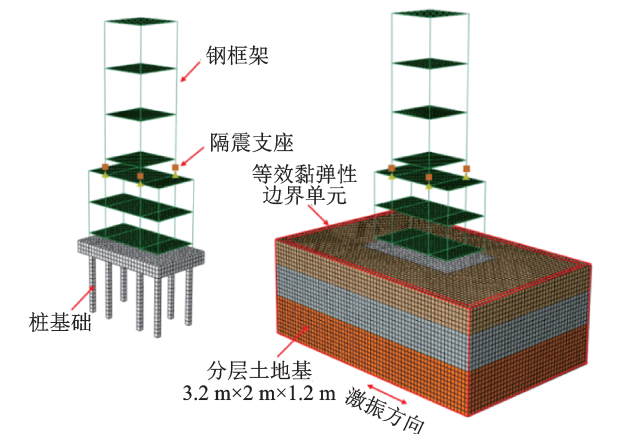


图 10 土-层间隔震结构有限元模型
Fig.10 Finite element model of inter-story isolation structure on ground

2 试验-数值结果分析

2.1 模型体系的动力特性

两种地基上模型结构自振周期对比如表7所示。分析可知:(1)隔震结构的自振周期较抗震结构

大幅延长,刚性地基上层间隔震结构自振周期试验值为抗震结构的2.64倍,土性地基上层间隔震结构自振周期试验值为抗震结构的1.98倍,表明考虑SSI效应后,隔震结构自振周期延长倍数降低。(2)土性地基上结构的自振周期较刚性地基均有延长,其中抗震结构周期试验值延长1.37倍,隔震结构延长1.03倍。(3)结构自振周期的试验值与计算值误差在5%以内,说明试验模型和数值模型具有较好的一致性。

表 7 结构自振周期

Tab. 7 Natural vibration period of structure

模型结构	自振周期/s			
	刚性抗震	刚性-层间隔震	土性抗震	土性-层间隔震
试验值	0.175	0.462	0.240	0.476
计算值	0.170	0.470	0.229	0.487
误差	2.86%	-1.73%	4.58%	-2.31%

2.2 楼层加速度及位移对比

不同加速度峰值近场脉冲地震动下楼层加速度和楼层位移的响应规律相似,限于篇幅,以0.2g近场脉冲地震动下层间隔震结构的楼层加速度、位移试验值和计算值对比进行分析,如图11,12所示。

由图11,12分析可知,两种地基上层间隔震结构的楼层加速度、楼层位移试验值和计算值曲线吻合度较高,响应规律基本一致,总体误差较小。

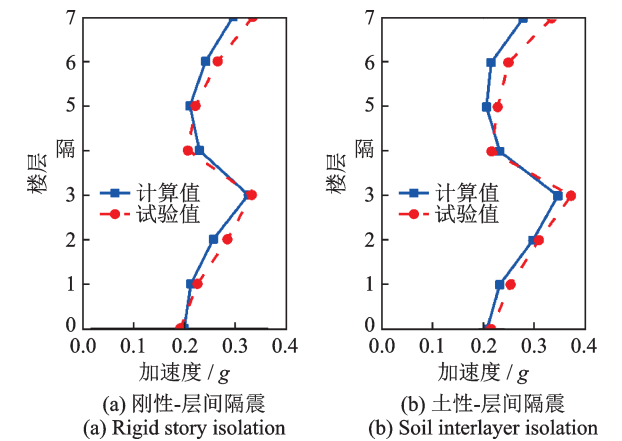


图 11 试验-数值加速度响应对比
Fig.11 Experimental and numerical acceleration response comparison

2.3 地基土放大效应

试验中在软夹层地基中布置了加速度传感器,以量测地基不同土层内加速度反应。土-隔震结构体系中土层内不同深度处的加速度放大系数(AMF)如图13所示。图13中测点位置0,0.4,0.7,

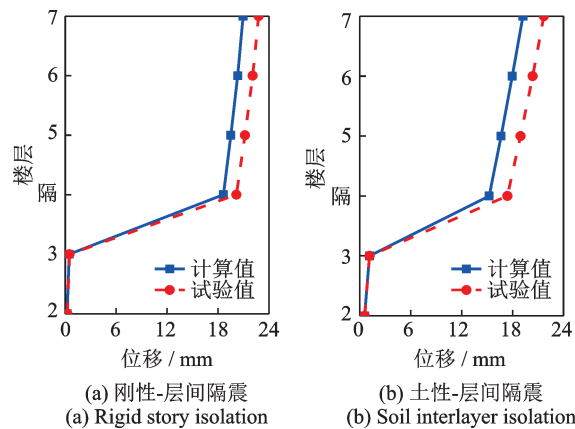


图 12 试验数值位移响应对比

Fig. 12 Experimental and numerical displacement response comparison

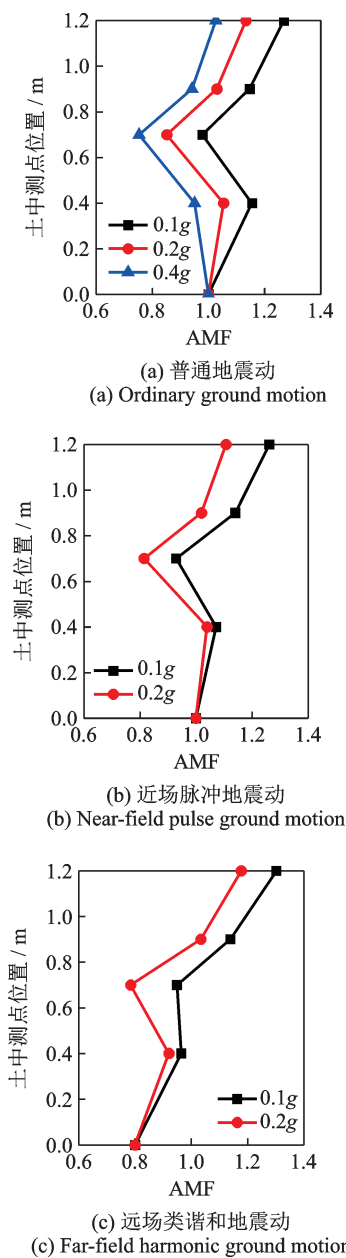


图 13 地基土放大系数

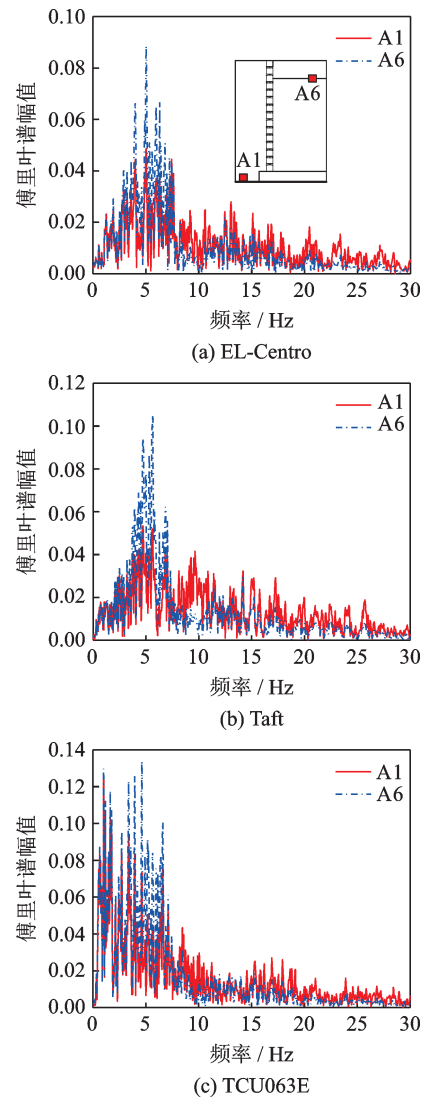
Fig. 13 Amplification magnification factor of soil

0.9, 1.2 m 分别对应台面测点 A1, 地基土内测点 A2, A3, A4 以及土表测点 A6。其中, 脉冲地震动峰值加速度为 $0.4g$ 的工况下, 振动台台面倾覆力矩过大, 导致振动台启动保护机制停止加载。

由图 13 分析可知, 不同类型地震动作用下, 土层内各测点的加速度放大规律基本一致。即当输入地震动加速度峰值较小时, 底层砂土对土内加速度反应起放大作用, 但随着加速度峰值增大, 则对土内加速度反应起减弱作用。地基土中间的软弱黏土层使加速度反应明显减小, 表明软弱黏土层具有一定的减震效果。远场类谐波和地震动下加速度的放大作用最显著, 随着加速度峰值的增大, 土体对加速度的放大作用减弱。分析可知, 当地震动激励较小时, 土体耗能较小; 当地震动激励增大时, 土体逐渐软化, 非线性增强, 传递振动的能力减弱, 从而导致放大作用减弱。总体来看, 软夹层地基的动力反应与地震动的强度和频谱特性相关。

2.4 地基土滤波效应

加速度峰值 $0.2g$ 时不同类型地震动作用下土-隔震体系测点 A1 和 A6 的傅里叶谱对比如图 14 所示。



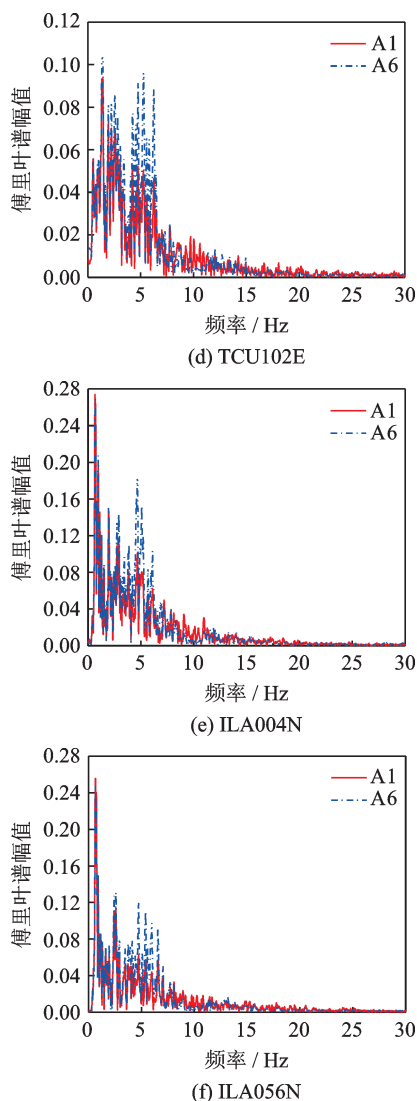


图14 傅里叶谱对比

Fig. 14 Fourier spectrum comparison

由图14分析可知,地震波经振动台输入模型地基后其傅里叶谱发生了明显的变化,主要表现为:土性地基过滤掉地震波的高频分量,增强部分中低频分量。经过地基土滤波后,土表测点的傅里叶谱在3~6 Hz的谱值得到增强,而8~30 Hz的谱值明显减小。进一步分析得,滤波后长周期地震波的傅里叶谱在0~2 Hz的谱值仍明显大于普通地震波,具有丰富的低频能量,对隔震结构等长周期结构影响较大。

2.5 不同地基上结构地震响应分析

将刚性地基和土性地基上的结构响应进行对比分析,研究SSI效应对普通地震动和长周期地震动下层间隔震结构的动力响应影响规律。

为分析隔震结构的减震效果,引入地震反应减震率 θ ,定义:

$$\theta = (1 - \frac{\Delta_i}{\Delta}) \times 100\% \quad (1)$$

式中 Δ_i 为隔震结构的响应峰值; Δ 为对应抗震结构的响应峰值。

2.5.1 楼层加速度响应

不同地震作用下地基土表加速度不同,因此引入加速度放大系数描述楼层加速度规律,定义:

$$\lambda = \frac{a_s}{a} \quad (2)$$

式中 a_s 为楼层加速度响应峰值; a 为结构基底加速度响应峰值。

普通、长周期地震动下刚性、土性地基的结构楼层加速度放大倍数对比如图15~17所示。

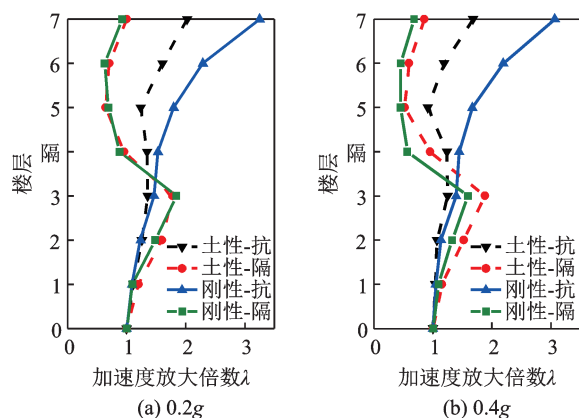


图15 加速度放大系数(普通地震动)

Fig. 15 Floor acceleration magnification (Under near-field pulse ordinary ground motion)

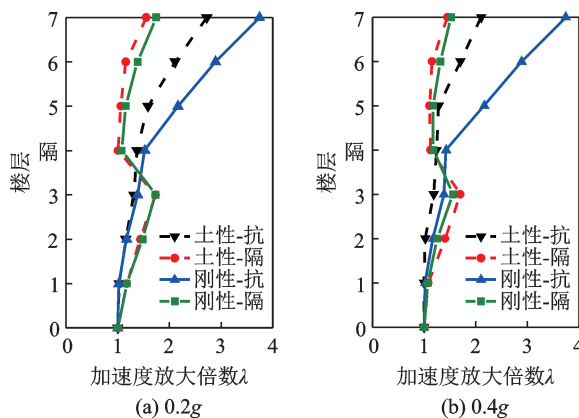


图16 加速度放大系数(近场脉冲地震动)

Fig. 16 Floor acceleration magnification (Under near-field pulse ground motion)

由图15~17分析可得:(1)不同地震动下,抗震结构考虑SSI效应后的加速度规律基本一致,整体楼层加速度放大倍数较刚性地基条件减小,其中上部塔楼减小明显,且随着加速度峰值的增加,减小效果越显著。分析表明:软夹层地基考虑SSI效应后会减小抗震结构加速度响应,土性地基具有天然的减震效果。(2)不同地基条件下,层间隔震结构的楼层加速度响应与输入地震动类型和强度相关。普通

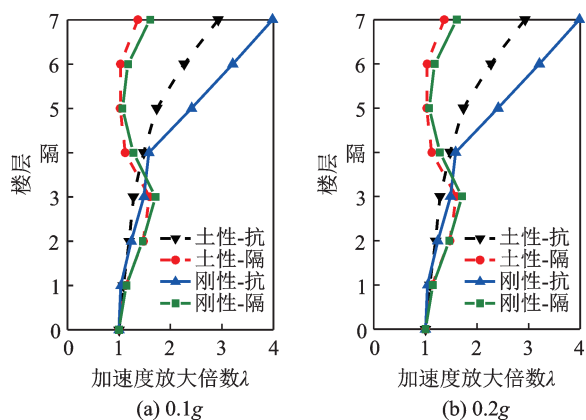


图17 加速度放大系数(远场类谐和地震动)

Fig. 17 Floor acceleration magnification (Under far-field harmonic ground motion)

地震动下,隔震结构考虑 SSI 效应后的楼层加速度放大倍数较刚性地基条件增大,减震效果变差。长周期地震动下,土性地基上部塔楼的加速度放大倍数较刚性地基减小;下部底盘与刚性地基条件下相比接近或增大。分析表明:软夹层地基 SSI 效应可能增大或减小层间隔震结构上部塔楼的加速度响应,下部底盘均有不同程度放大,因此考虑 SSI 效应后应重点关注底盘的抗震设计。

2.5.2 楼层位移响应

普通地震动、长周期地震动下刚性地基和土性地基的结构楼层位移对比如图 18~20 所示。

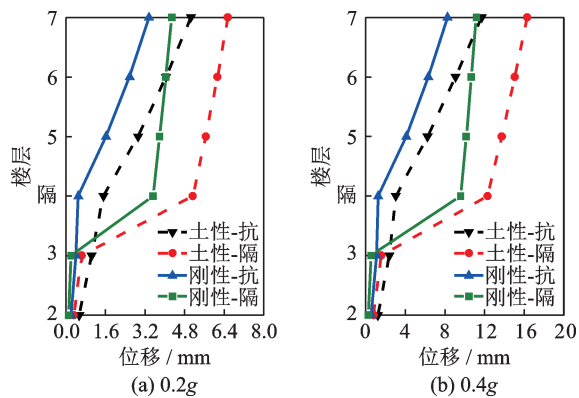


图18 楼层位移(普通地震动)

Fig. 18 Displacement response (Under ordinary ground motion)

由图 18~20 分析可知:

(1)结构在土性地基上的楼层位移较刚性地基条件下显著增大。分析可得,由于土体非绝对刚性,软弱地基上的桩基承台在地震动作用下会发生平动和转动,从而导致上部结构的整体水平位移由平动、转动和自身的变形组成。可推测随着地基土的进一步变软,结构的位移将继续增大。

(2)长周期地震动下隔震结构的位移响应远大于普通地震动作用,其中 0.2g 远场类谐和地震动下

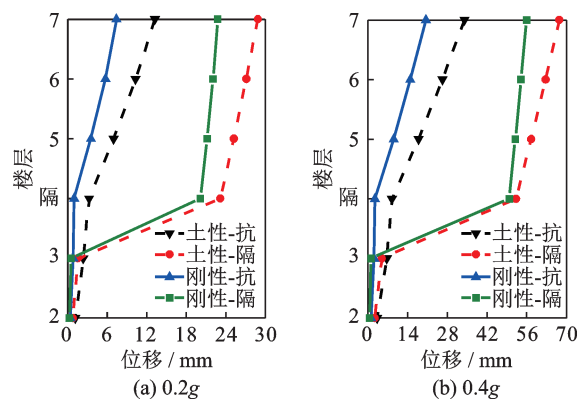


图19 楼层位移(近场脉冲地震动)

Fig. 19 Displacement response (Under near-field pulse ground motion)

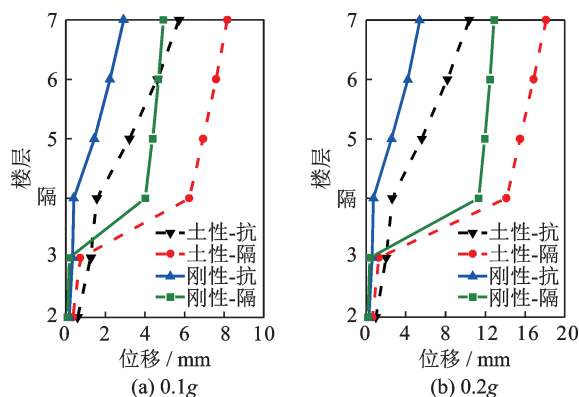


图20 楼层位移(远场类谐和地震动)

Fig. 20 Displacement response (Under far-field harmonic-alike ground motion)

隔震层位移约为普通地震动下的 2.86 倍,近场脉冲地震动下为 4.82 倍。近场脉冲地震动不同峰值下隔震层的位移均远超过普通地震动作用的 1.5 倍,超出《建筑抗震设计规范》^[17]中近场影响系数的取值范围,说明该系数不能全面考虑脉冲地震动的特性。0.4g 峰值加速度下隔震层位移达到 47.37 mm,超过隔震支座水平位移限值(38.5 mm),支座失效破坏,需要采取限位措施进行保护。

加速度峰值 0.2g 时的层间位移减震率和 SSI 效应放大系数如表 8,9 所示(注:SSI 效应放大系数=土性地基结构响应/刚性地基结构响应)。

由表 8,9 分析可知:(1)考虑 SSI 效应后,隔震结构层间位移减震率较刚性地基条件有所降低。普通地震动下刚性地基的塔楼减震率为 69.60%~76.33%,土性地基上降至 57.49%~62.78%;长周期地震动作用下塔楼减震率降幅更大,由 61.42%~67.05%降至 43.04%~53.50%。(2)抗震结构的 SSI 效应放大系数小于相应的隔震结构,说明 SSI 效应对隔震结构层间位移的影响更为显著。下部底盘的 SSI 效应放大系数较上部塔楼大的多,如普通地震动作用下隔震结构的底盘最大层间位移较刚性地基

表 8 层间位移减震率对比
Tab. 8 Comparison of interlayer displacement damping ratio

楼层	普通地震动/%		近场脉冲地震动/%		远场类谐和地震动/%	
	刚性	土性	刚性	土性	刚性	土性
7	69.60	57.49	61.42	43.30	64.86	43.04
6	73.17	58.32	63.59	47.56	67.05	47.90
5	76.33	62.78	65.31	49.97	65.86	53.50
隔	-	-	-	-	-	-
3	47.72	37.72	43.55	36.57	42.74	38.65
2	49.51	39.51	44.88	34.11	38.51	35.44

表 9 层间位移 SSI 效应放大系数对比
Tab. 9 Comparison of SSI effect amplification factors of interlayer displacement

楼层	普通地震动		近场脉冲地震动		远场类谐和地震动	
	抗震	隔震	抗震	隔震	抗震	隔震
7	1.27	1.78	1.78	2.63	1.84	2.98
6	1.19	1.85	1.51	2.17	1.57	2.49
5	1.25	1.96	1.48	2.13	1.63	2.23
隔	-	1.36	-	1.03	-	1.17
3	2.54	3.03	2.78	3.12	2.96	3.17
2	2.59	3.11	2.82	3.38	3.37	3.53

放大了 3.11 倍,而上部塔楼则放大 1.96 倍。因此,基于刚性地基假定进行结构的隔震设计是偏不安全的。(3)长周期地震动下结构的 SSI 效应放大系数较普通地震动大,远场类谐和地震动中谐波成分使 SSI 效应的影响最为明显。考虑 SSI 效应后隔震层位移均有放大,长周期地震动作用下未考虑 SSI 效应的隔震层位移值较大,考虑 SSI 效应后虽有放大,但放大系数较普通地震动不明显。

2.5.3 楼层剪力响应

不同地震动 0.1g、0.2g 作用下抗震结构和隔震结构在刚性、软夹层地基上的层间剪力计算值对比如图 21~23 所示。楼层指模型的层数,楼层 1 和 2 代表下部底盘,楼层 3、4 和 5 代表上部塔楼三层。

由图 21~23 分析可知:
(1)两种地基上结构采用层间隔震技术后,均能有效降低层间剪力。土性地基上抗震结构的层间剪力较刚性地基条件下明显降低,表现为底层、中间层减小幅度较大,顶层减小幅度较小。土性地基上隔震结构的层间剪力较刚性地基条件略有增大,随着加速度峰值的增加,SSI 效应对结构层间剪力的影响更为明显,隔震结构的减震效果变差。

(2)相同加速度峰值时,长周期地震动作用下结构的层间剪力明显大于普通地震动作用,其中 0.2g

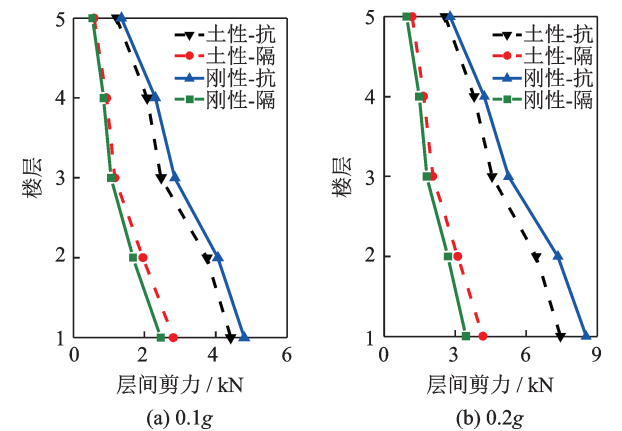


图 21 层间剪力(普通地震动)
Fig. 21 Story shear(Under ordinary ground motion)

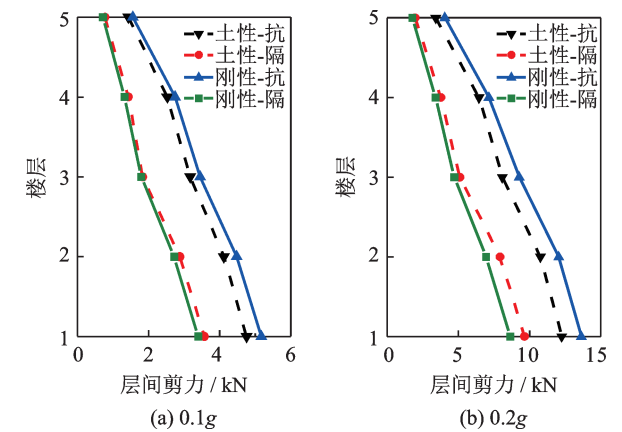


图 22 层间剪力(近场脉冲地震动)
Fig. 22 Story shear(Under near-field pulse ground motion)

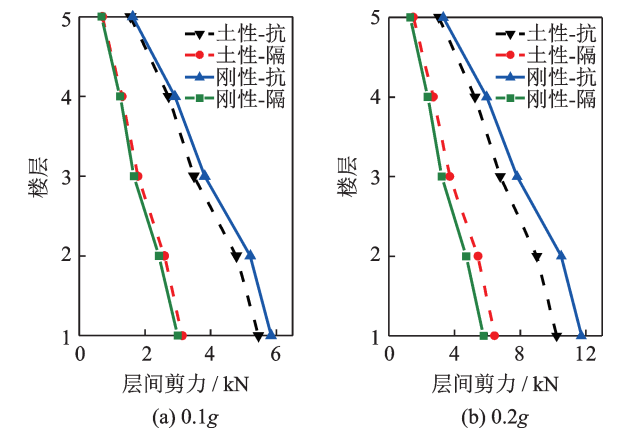


图 23 层间剪力(远场类谐和地震动)
Fig. 23 Story shear (Under far-field harmonic-alike ground motion)

近场脉冲地震动下隔震结构的底层剪力约为普通地震动下的 2.5 倍,为远场类谐和地震动下的 1.5 倍,减震效果较差。

3 结 论

(1)SSI 效应使抗震结构和层间隔震结构的自

振周期较刚性地基均有增大,但采用隔震技术后延长的周期倍数降低。土性地基上抗震结构周期试验值较刚性地基延长1.37倍,而土性地基上隔震结构较刚性地基仅延长1.03倍。

(2)软夹层地基对输入地震动具有明显放大和滤波效应,与地震动的峰值和频谱特性相关。底层砂土对输入加速度峰值可能起放大或减弱作用;中间软弱黏土层起减弱作用,具有明显的减振效果;顶层砂土起放大作用。土性地基过滤地震波的高频分量,增强部分中低频分量。

(3)SSI效应对层间隔震结构的地震响应以放大作用为主,对下部底盘和隔震层的影响较大。土性地基上隔震结构的楼层位移、剪力较刚性地基增大。SSI效应对下部底盘和隔震层的加速度响应起放大作用;根据输入地震动类型和强度的不同,可能增大或减小隔震层上部塔楼的加速度响应。

(4)长周期地震动下的地震响应较普通地震动更为强烈,减震效果差,特别是考虑SSI效应后近场脉冲地震动下隔震层位移超限,体系减震效率最差。相同加速度峰值时,长周期地震动作用下结构的层间剪力明显大于普通地震动作用下的层间剪力,其中0.2g近场脉冲地震动下隔震结构的底层剪力约为普通地震动下的2.5倍,为远场类谐和地震动下的1.5倍,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.
Tan Ping, Zhou Yun, Zhou Fulin, et al. Hybrid isolation control for multi-tower structures with a large podium[J]. World Earthquake Engineering, 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.
Zhou Fulin, Cui Hongchao, Shigetaka A B E, 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.
- [3] Ariga T, Kanno Y, Takewaki I. Resonant behaviour of base-isolated high-rise buildings under long-period ground motions[J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2006, 15(3): 325-338.
- [4] 王亚楠,杜永峰,胡高兴.远场长周期地震动作用下隔震结构的抗震性能及控制措施研究[J].特种结构,2017,34(5):110-115.
Wang Yanan, Du Yongfeng, Hu Gaoxing. Performance research and control measure on seismically isolated structures under far-field long period ground motions[J]. Special Structures, 2017, 34(5): 110-115.
- [5] 杜晓磊,吴进标,李志,等.近断层脉冲地震作用下基础隔震体系动力响应[J].低温建筑技术,2019,41(12):102-105.
Du Xiaolei, Wu Jinbiao, Li Zhi, et al. Research on seismic response of base isolation system under near-fault impulse earthquake[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41(12): 102-105.
- [6] Wang S J, Chang K C, Hwang J S. Simplified analysis of mid-story seismically isolated buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(2): 119-133.
- [7] Enrique Luco J. Effects of soil-structure interaction on seismic base isolation[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 66:167-177.
- [8] 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.
Yu Xu, Zai Jinming, Wang Zhihua. Shaking table model test on lead core rubber bearing in isolation structure system considering SSI[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(6): 786-792.
- [9] 李昌平,刘伟庆,王曙光,等.软土地基上高层间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 Changping, Liu Weiqing, Wang Shuguang, et al. Shaking table test on high-rise isolated structure on soft soil foundation[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 72-78.
- [10] Zhuang Haiyang, Yu Xu, Zhu Chao, et al. Shaking table tests for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 67: 208-218.
- [11] Zhuang Haiyang, Fu Jisai, Yu Xu, et al. Earthquake responses of a base-isolated structure on a multi-layered soft soil foundation by using shaking table tests[J]. Engineering Structures, 2019, 179: 79-91.
- [12] 吴应雄,郑泽伟,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.
Wu Yingxiong, Zheng Zewei, Yan Guiyun, et al. Shaking table test of pile-soil inter-storey isolated structure under far-field long-period ground motion[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(12): 11-22.
- [13] 党育,李连峰.长周期地震动的界定及对应场地发生概率[J].兰州理工大学学报,2018,44(6):112-117.
Dang Yu, Li Lianfeng. Definition of long-period ground motion and its occurrence probability on variously classified site[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(6): 112-117.
- [14] 许立英,吴应雄,田泓.长周期地震动下软土地基的基

- 础隔震结构振动台试验研究[J/OL]. 建筑结构学报, 2021: 1-14. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2021.0097>.
- Xu Liying, Wu Yingxiong, Tian Hong, et al. Shaking table test of inter-story isolation structure on a soft inter-layer ground under long-period ground motion[J/OL]. Journal of Building Structures, 2021: 1-14. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2021.0097>.
- [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.
- Xu Liying, Liu Ning, Wu Yingxiong. Definition and selection of long-period ground motion based on the antiseismic analysis[J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(4): 569-578.
- [16] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007(12): 31-37.
- Gu Yin, Liu Jingbo, Du Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007(12): 31-37.
- [17] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- National Standards of People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.

Shaking table test of inter-story isolation structure on a soft interlayer ground under long-period ground motion

WU Ying-xiong¹, CHEN Jin-yang¹, FANG Hong-jie¹, SHI Jian-ri², XU Li-ying³

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

2.Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Fuzhou 350001, China;

3.School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Long-period ground motion is easy to cause strong seismic response of isolated structure, which may be more disadvantageous when considering soil-structure interaction (SSI effect). In order to explore the influence of the SSI effect of the weak inter-layer foundation under the long-term period of ground vibration on the dynamic response law and shock absorption performance of the layer interval vibration structure, the numerical simulation and vibration platform test of the single tower layer interval vibration structure of the large chassis on the rigid and soft interlayer foundation are carried out. The results show that the soft interlayer foundation has an obvious amplification and filtering effect on the input ground vibration, which is associated with the peak and spectral characteristics of the ground vibration. After considering SSI effect, the natural vibration period of the structure is larger than that of the rigid foundation, but the extended period multiple of the isolation technology is lower. The SSI effect enlarges the acceleration response to the lower chassis and the diaphragm, and may increase or decrease the acceleration response of the upper tower, depending on the type and intensity of the input seismic vibration. After considering the SSI effect, the seismic response of the isolation structure under long-period ground motions is stronger than that of ordinary ground motions, and the damping effect becomes worse. In particular, the displacement of the isolation layer under near-field impulse ground motions exceeds the limit, the damping effect is poor, and the system fails.

Key words: long-period ground motion; soil-structure interaction; soft interlayer ground; inter-story isolation; shaking table test

作者简介: 吴应雄(1969—),男,博士,教授。电话:13305911886;E-mail:wxfz2006@163.com。

通讯作者: 许立英(1981—),女,博士,讲师。电话:15881635580;E-mail:lyingxu@126.com。