

软土地基上桩-土-高层结构体系动力特性的振动台试验

杨金平^{1,2}, 李培振¹, 吴雯¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了研究软土地基上桩-土相互作用对高层结构动力特性的影响机理, 设计了 1:6 比例的高层结构-桩-土动力相互作用体系, 进行了软土地基上框架结构的模型振动台试验。试验采用层状剪切盒模拟土体的边界, 锯末和砂土的混合物作为地基土, 以 12 层钢筋混凝土框架结构模拟上部结构, 基础采用 3×3 群桩基础。通过对比考虑土-结构相互作用 (SSI) 框架模型和刚性地基框架模型的结构动力特性, 总结出本试验中 SSI 效应对高层框架结构的动力特性影响规律: 土体对地震动存在显著的过滤作用, 放大土体基频附近的振动, 且放大幅度随地震动的加强而减小; 小震时土体对加速度峰值起放大作用, 而在大震时起减小峰值的作用; 考虑 SSI 效应后, 结构的频率降低, 阻尼比提高, 结构的损伤出现得更晚, 发展也更慢。在土体频率处, SSI 体系的振型受土体影响显著; 在远离土体频率处, SSI 体系振型与刚性地基一致。

关键词: 土-结构相互作用; 动力特性; 振动台试验; 高层结构; 软土地基

中图分类号: TU318

文献标志码: A

Shaking Table Tests on Dynamic Characteristics of Pile-Soil-High Rise Structure System on Soft Soil Foundation

YANG Jinping^{1,2}, LI Peizhen¹, WU Wen¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Shaking table tests are designed and performed on high-rise frame structures considering pile-soil dynamic interaction system and a frame structure model on fixed-base condition with the 1:6 scaling factor in this paper to study the influence mechanism of pile-soil

interaction on the dynamic characteristics of high-rise structures on soft soil foundation. The layered shear box is used to simulate the boundary of soil. The mixture of sawdust and sand is adopted as the foundation soil, and the superstructure is a 12-story reinforced concrete frame structure. The foundation adopts the 3 × 3 pile group foundation. By comparing the structural dynamic characteristics of the soil structure interaction (SSI) frame model and the fixed-base model, the influence law of the SSI effect on the high-rise frame structure in this test is summarized. The soil has a significant filtering effect on ground motion. It mainly amplifies the vibration near the fundamental frequency of the soil, and the amplification amplitude decreases with the strengthening of ground motion. The soil amplifies the peak acceleration in minor earthquakes and reduces the peak acceleration in major earthquakes. The frequency of the structure in the SSI system decreases and the damping ratio increases. The structural damage in the SSI system appears later and develops more slowly than that of the fixed-base structure. At the frequency of soil, the vibration mode of SSI system is significantly affected by the soil, and its vibration mode amplitude distribution is obviously different from that of the fixed-base structure. The vibration mode of the SSI system far away from the soil frequency is consistent with that of the fixed-base model.

Key words: soil-structure interaction; dynamic characteristics; shaking table test; tall building; soft soil

土-结构动力相互作用 (soil structure interaction, SSI) 或桩-土-结构相互作用 (PSSI) 作为一个复杂的有机整体, 在地震作用下存在相互影

收稿日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51978524, 52108134)

第一作者: 杨金平 (1988—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为土与结构相互作用。

E-mail: jping_yang@haut.edu.cn

通信作者: 李培振 (1975—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土与结构相互作用、结构抗震等。

E-mail: lipeizh@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

响^[1]。结构的动力特性(如固有频率、阻尼比和振型等)作为结构的重要参数被广泛应用于结构的抗震设计、健康监测和振动控制等领域中^[2]。在现有的抗震设计中,一般假定为刚性地基,即忽略了SSI的影响,然而,试验与理论结果均表明:SSI体系中上部结构在地震动的作用下其响应与刚性地基下的结构不同,这种差异在软土地区中更为明显^[3]。因此现行抗震设计中忽略SSI效应将对结构的动力特性及其地震响应造成一定的影响。

随着结构振动控制技术及对地下地基土复杂性认知的发展,学者对考虑SSI效应的减震结构、隔震结构、砂土液化等体系的动力特性和结构响应进行了试验与理论研究。李培振等^[4]进行了可液化土-高层结构相互作用的振动台试验研究。钱德玲等^[5]对考虑SSI效应的某超高层框架-核心筒结构试验进行了研究。于旭等^[6]对软夹层地基上多层隔震结构体系进行了研究。王曙光等^[7]对考虑SSI效应的设置黏滞阻尼器的钢框架结构进行了振动台试验。潘且光等^[8]对结构-土-结构相互作用(SSSI)体系进行了动力特性研究。刘伟庆等^[9]对土体剪切波速、结构高度与基础特征宽度的比值对不同周期、不同阻尼比的减震结构动力特性的影响进行了分析。Jabary^[10]对TMD的装置位置对考虑SSI效应的多自由度体系的影响进行了研究,表明TMD的楼层位置比其设置数量更能影响TMD的减震性能。Forcellini^[11]对考虑SSI效应的位于浅基础上的两个标准模型进行了易损性研究。以上研究发现:SSI效

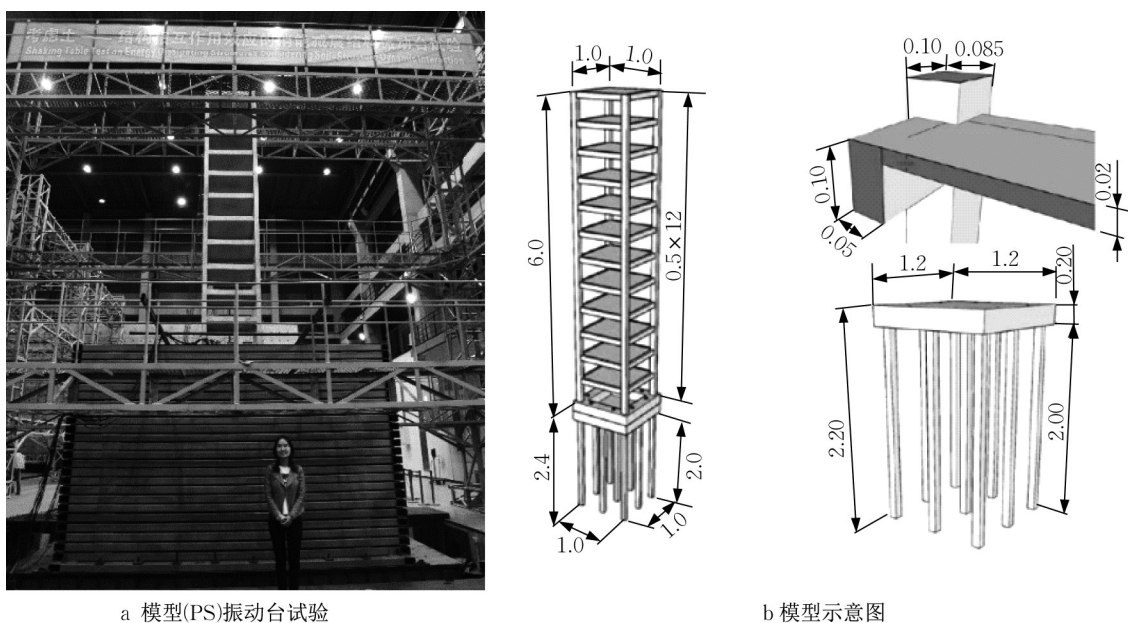
应改变了结构的动力特性参数^[12],而且在对考虑SSI效应的减隔震结构体系研究中发现,SSI效应削弱了振动控制装置的减震效率^[13-15],甚至出现了负面的减震效果。因此深入研究SSI效应对结构动力特性的影响机理是十分必要的。

目前的研究在SSI体系的动力特性理论分析方法上存在一定程度的简化,而且由于SSI问题本身的复杂程度以及试验研究中诸多因素的限制使得试验缩尺比例过小,实际与理论结果存在一定的差距。因此,本文以相似比1:6的带3×3桩基的12层钢筋混凝土框架结构为模型结构,进行了大比例软土地基上考虑桩-土-结构相互作用的高层建筑结构振动台试验,探讨高层框架结构在地震过程中地基、基础和上部结构作为一个有机整体的动力特性,并与刚性地基上的结果进行对比分析,揭示了SSI效应对高层结构的动力特性影响规律,为发展行之有效的抗震设计分析、数值模拟方法和结构控制理论提供试验依据。

1 振动台试验介绍

1.1 试验内容

本文进行了软土地基上桩-土-12层框架结构(PS)振动台试验和直接固定在振动台台面上以模拟刚性地基上12层框架结构(RS)振动台试验。PS振动台试验模型如图1所示。



a 模型(PS)振动台试验

b 模型示意图

图1 桩-土-结构相互作用模型(单位:m)

Fig. 1 Shaking table test on pile-soil-structure interaction (PS) model(unit:m)

本试验原型结构为双向单跨的12层框架结构,基础为 3×3 布置的桩筏基础,地基土为软土,其构件截面和配筋根据相关规范进行设计。模型按原型尺寸1:6缩尺,即长度相似比 $S_l=1/6$ 、密度相似比 $S_\rho=1$ 和弹性模量相似比 $S_E=1/2$ 。3作为设计控制量。振动台模型试验中采用M8的混合砂浆作为模型的浇筑材料,其立方体强度和弹性模量楼层均值分别为7.291 MPa和 1.333×10^4 MPa。考虑到试验过程中的可操作性,模型桩基与上部结构采用装配式浇筑,预留有一定尺寸的螺栓孔。为了测试上部结构和土体的动力响应,在结构的每一楼层布置了加速度计、位移计,在土体中布置了加速度计,传感器布置方案参见文献[16]。

模型土采用黄砂与木屑的1:2.5混合物。与实际土体相比,该模型土密度小,动力特性与实际土体接近,并且通过修改配比和含水量可以方便地调整模型土的动力特性,以满足相似比和振动台试验要求。通过模型土的循环三轴联合试验结果得出土体的初始动剪切模量 G_0 为6.3 MPa,模型土的 $G_d/G_0\sim\gamma_d$ 、 $D\sim\gamma_d$ 曲线如图2所示,其中 G_d 、 D 、 γ_d 分别为土体的动剪切模量、阻尼比和动剪应变。由于本试验结构相似比较大,相应的模型地基土体体积大,质量重,因此采用了层状剪切盒作为土体容器,可以有效减小“边界效应”的影响,其设计尺寸为 $4.80\text{ m}\times 4.10\text{ m}\times 2.96\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。

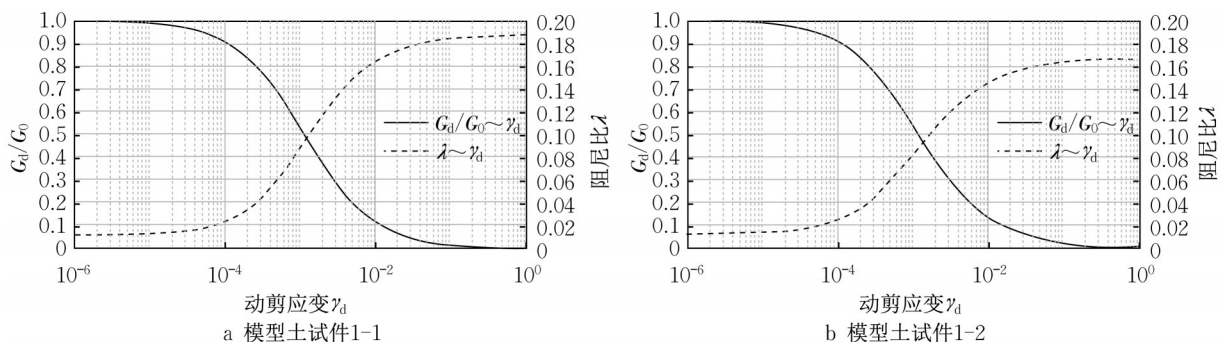


图2 模型土的 $G_d/G_0\sim\gamma_d$ 、 $D\sim\gamma_d$ 曲线

Fig. 2 $G_d/G_0\sim\gamma_d$ and $D\sim\gamma_d$ curves of model soft soils

1.2 试验加载制度

试验采用单向(X向)输入激励,台面输入波形为上海基岩波、Kobe波和Chi-Chi波。加速度峰值按我国抗震规范的地震震中烈度加速度值对应输入,按相似关系调整加速度峰值和时间间隔,台面输入加速度峰值按小量级分级递增,每次激励为1次波形输入。改变震级前后都进行白噪声扫频,用以了解结构的动力特性的变化。

RS模型的地震动输入采用PS模型试验测得的对应工况的土表自由场加速度,这样可以认为两模型上部结构的加速度输入一致,地震响应差异来自SSI效应。由于逐级加载后结构损伤严重,考虑到试验安全,PS模型加载到了第5级的SJ5工况,加上最后的白噪声扫频WN6工况;而RS模型在保护装置的确下,完成了全部6级加载,具体加载方案如表1所示。表中SJ为上海基岩波,KB为Kobe波,CC为Chi-Chi波,WN为白噪声扫频。

表1 桩-土-结构振动台试验加载制度

Tab. 1 PS shaking table test program

序号	工况	加速度峰值/g	
		原型	1/6模型
1	WN1		0.07
2~4	SJ1, KB1, CC1	0.05	0.13
5	WN2		0.07
6~8	SJ2, KB2, CC2	0.10	0.27
9	WN3		0.07
10~12	SJ3, KB3, CC3	0.20	0.53
13	WN4		0.07
14~16	SJ4, KB4, CC4	0.30	0.80
17	WN5		0.07
18~20	SJ5, KB5, CC5	0.40	1.07
21	WN6		0.07
22~24	SJ6, KB6, CC6	0.50	1.33
25	WN7		0.07

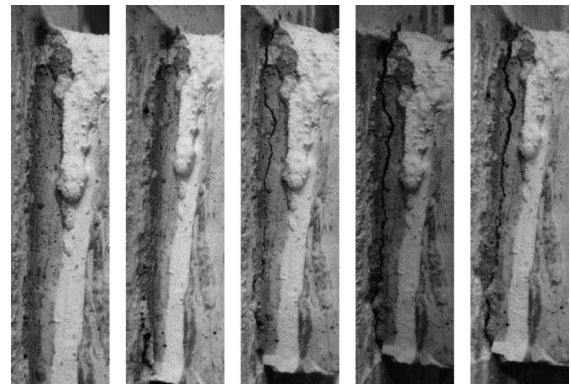
2 试验现象

对于RS模型,试验的主要现象是结构损伤,根据损伤的位置和成因主要分为梁端受弯裂缝和柱端受弯裂缝及压碎两类。

梁端受弯裂缝主要分布在与地震动加载方向平

行的梁截面上,它们是参与抗震的主要梁构件。在地震作用下,最大弯矩分布于梁端,首先导致梁顶、梁底和两侧角部开裂,出现垂直于梁轴向的细小裂缝;随着地震动峰值的加大和损伤的累积,梁侧角部裂缝逐渐向中性面发展直到贯通,同时裂缝宽度也逐渐增加。RS模型4层1~2/A梁1端的裂缝发展如图3所示。

柱端受弯损伤主要分布于垂直于地震动加载方向的各层柱端的截面上,它们是柱受弯时应变最大的位置。在地震作用下,最大弯矩位于柱端,首先导致柱端的角部开裂,出现水平细小裂缝;随着地震动峰值加大和损伤的累积,裂缝先在垂直于地震动加载方向的柱截面贯通,在平行于地震动加载方向的柱截面逐渐向中性面发展,直至贯通;由于轴向压力的作用,裂缝宽度没有明显变化;随着地震动输入的进一步加大,垂直于地震动加载方向的柱截面混凝

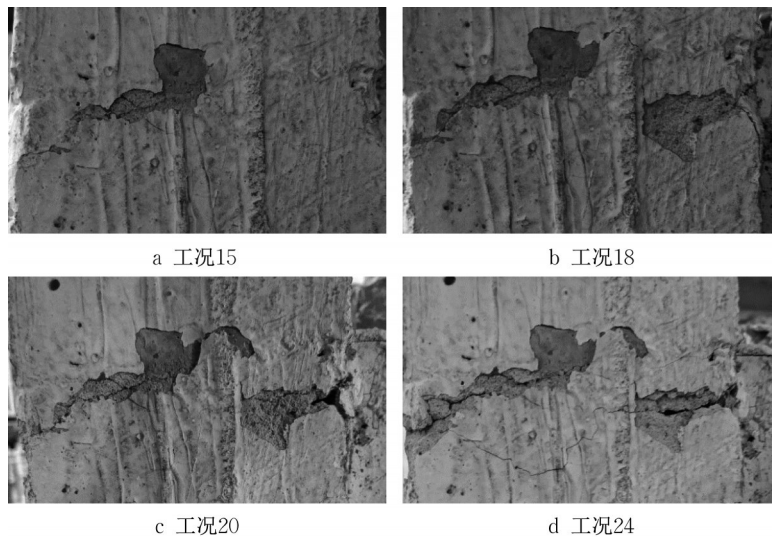


a 工况8 b 工况12 c 工况18 d 工况20 e 工况24

图3 RS模型梁端4层受弯裂缝

Fig. 3 Bending crack at beam end on the 4th floor of RS model

土受弯压碎脱离,柱端出现较大转动使结构扭曲。RS模型7层柱顶端的损伤发展如图4所示。



a 工况15

b 工况18

c 工况20

d 工况24

图4 RS模型7层柱端受弯损伤

Fig. 4 Bending crack at column end on the 7th floor of RS model

RS模型梁端裂缝分布,上部(9、10、11层)裂缝最大、下部(3、4层)次之,其他层裂缝较小;框架柱端损伤分布,上部(9、10、11层)最严重,中部(6、7、8层)次之,其他层损伤较少。

PS模型的试验现象也主要为结构损伤,同样的可以分为梁端受弯裂缝和柱端受弯裂缝及压碎,如图5所示。PS模型梁端裂缝分布发现,上部(9、10、11层)裂缝最大、下部(3、4层)次之,其他层裂缝较小;框架柱端损伤分布,上部(9、10、11层)最严重,中部(8层)次之,其他层损伤较少。

试验结束后,对PS模型的桩基损伤进行了检查,发现基础没有出现明显的损伤。

3 土体特性分析

地震动从基岩经过土层传播到土表,其峰值和频谱成分会发生变化,该变化与土体的特性密切相关。试验中采集了不同深度处土层加速度,本小节将从频率、加速度时程及频谱和加速度放大系数等方面讨论土体对地震动的影响。

3.1 频率

在地震过程中,土体频率与土体剪切模量和深度等因素相关,PS模型土体频率如表2所示。从表中可以看出,在峰值恒定在0.07g的白噪声(WN工况)作用下,土体频率保持在5 Hz左右,说明在整个加载过程

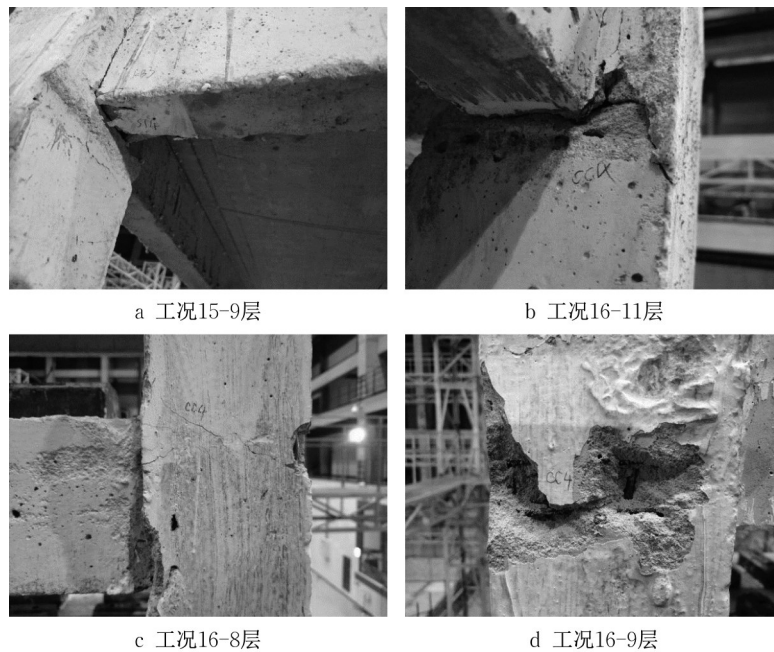


图5 PS模型损伤照片

Fig. 5 Crack photo of PS model

中土体的性质没有出现较大变化。在其他三组(SJ工况、KB工况、CC工况)峰值逐级递增的地震动作用下,土体频率出现了明显的下降,这是因为逐级增大的地震动导致土体的剪切变形增大,一般而言随着剪应变的增加土体的剪切模量会有所下降,从而土体的等效剪切模量降低,导致土体频率下降。

表2 土体频率

Tab. 2 Frequency of soil

加载等级	地震动下土体频率/Hz			
	WN	SJ	KB	CC
1	5.36	5.39	4.92	5.11
2	5.30	5.12	3.93	4.25
3	5.02	4.74	3.59	3.84
4	4.92	4.07	3.51	3.31
5	4.94	3.63	—	—

3.2 时程与频谱

SJ1工况下不同埋深的自由场土体加速度时程与频谱如图6所示。A8测点(距离土体底部0.4 m处)、A11测点(距离土体底部1.6 m处)、A14测点(距离土体底部2.8 m处即土体表面)埋深逐渐减小。从时程曲线可以得出:地震动从台面到土表面其峰值明显放大;从频谱曲线中可以得出:地震动的放大成分主要集中在土体基频5 Hz左右,其他频率成分放大幅度相对较小。

SJ3工况和SJ5工况下不同埋深的自由场土体加速度时程和频谱分别如图7和图8所示,从时程曲

线可以得出:随着输入加速度峰值的增大,地震动从台面到土表面其峰值有所减小;从频谱曲线看,在土表处,地震动在土体基频部分有所放大,但在高频部分有所减小,土体对高频部分有着明显的滤波作用。

从图6~图8中可以得出:随着地震动峰值增加,土体的频率减小,结合地震动的加速度响应谱的特性,一般而言土体的放大效应是逐渐减弱的。另一方面,随着土体动态剪应变的增加,土体的阻力比增加,其能量耗散效果增强,因此在地震动峰值较大时,经过土体的地震动可能出现峰值降低的现象。

各层土体的加速度放大系数如图9所示,可以看出:各层土体的加速度放大系数均随着地震峰值的增加而减小,在地震动峰值较大时,在中间土层普遍出现了放大系数小于1的情况,其中上海基岩波在加载等级4和加载等级5时,甚至土表面的放大系数也小于1,出现了明显的隔震效果。

4 结构动力特性

识别结构的动力特性,是振动台试验处理的一个重要方面。本文采用Levy法(也称多项式拟合法)对各级加载后的结构特性进行了识别。本节将从结构频率、等效黏滞阻尼比和结构振型等方面介绍结构动力特性及其变化规律。

4.1 频率与阻尼比

与刚性地基相比,考虑SSI效应后,其基础可以

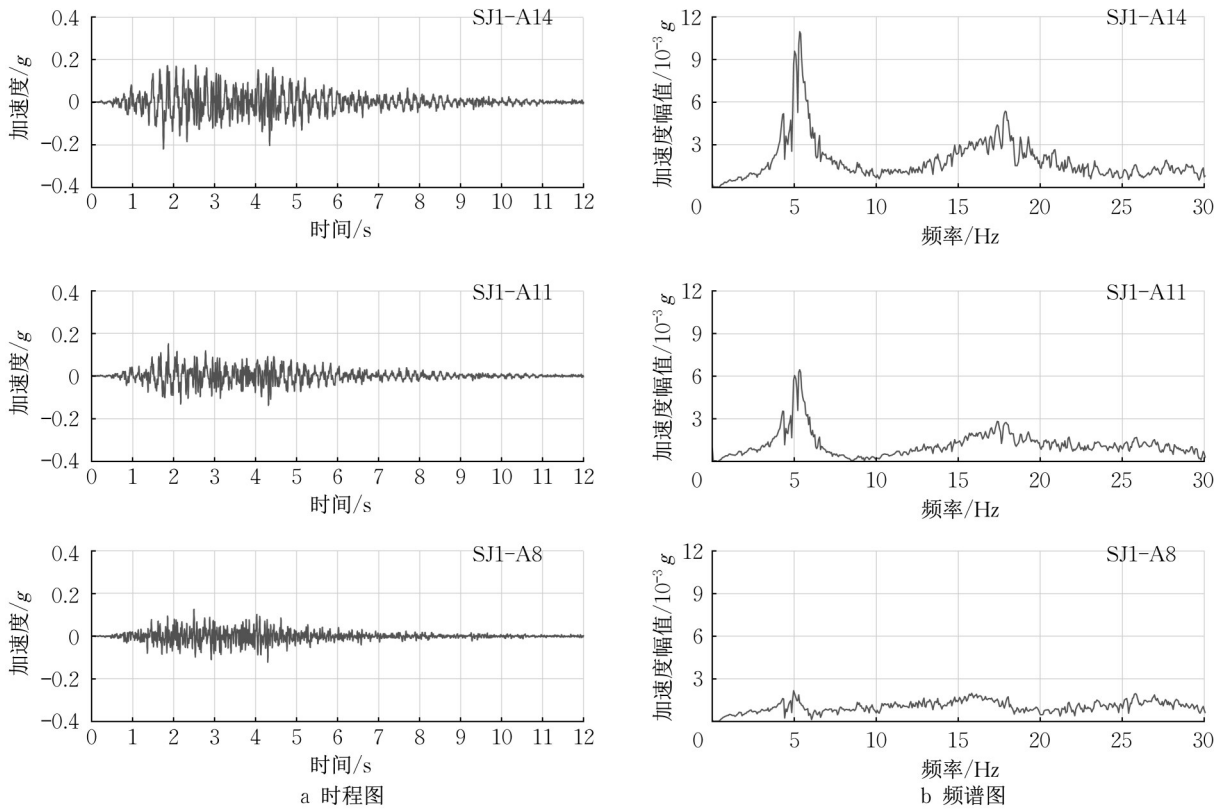


图 6 SJ1 工况下土体加速度时程图与频谱图

Fig. 6 Soil acceleration time-history and corresponding Fourier spectrum in SJ1 case

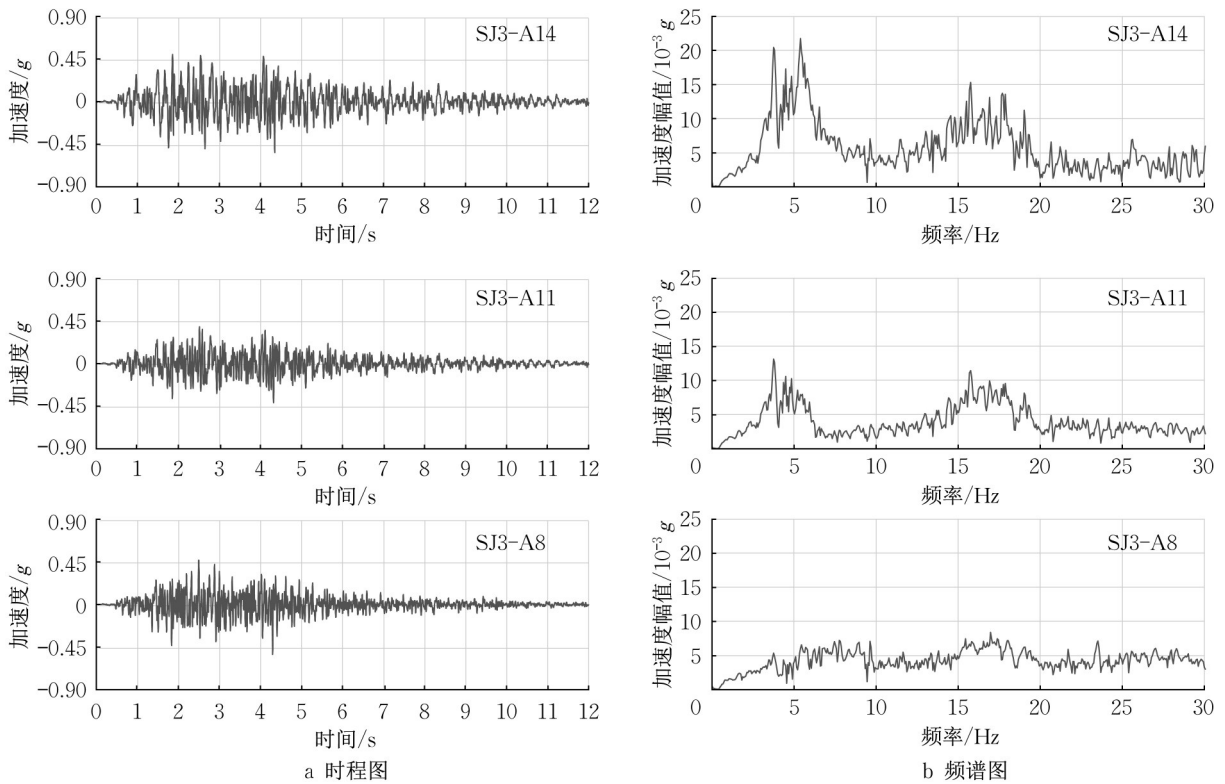


图 7 SJ3 工况下土体加速度时程图与频谱图

Fig. 7 Soil acceleration time-history and corresponding Fourier spectrum in SJ3 case

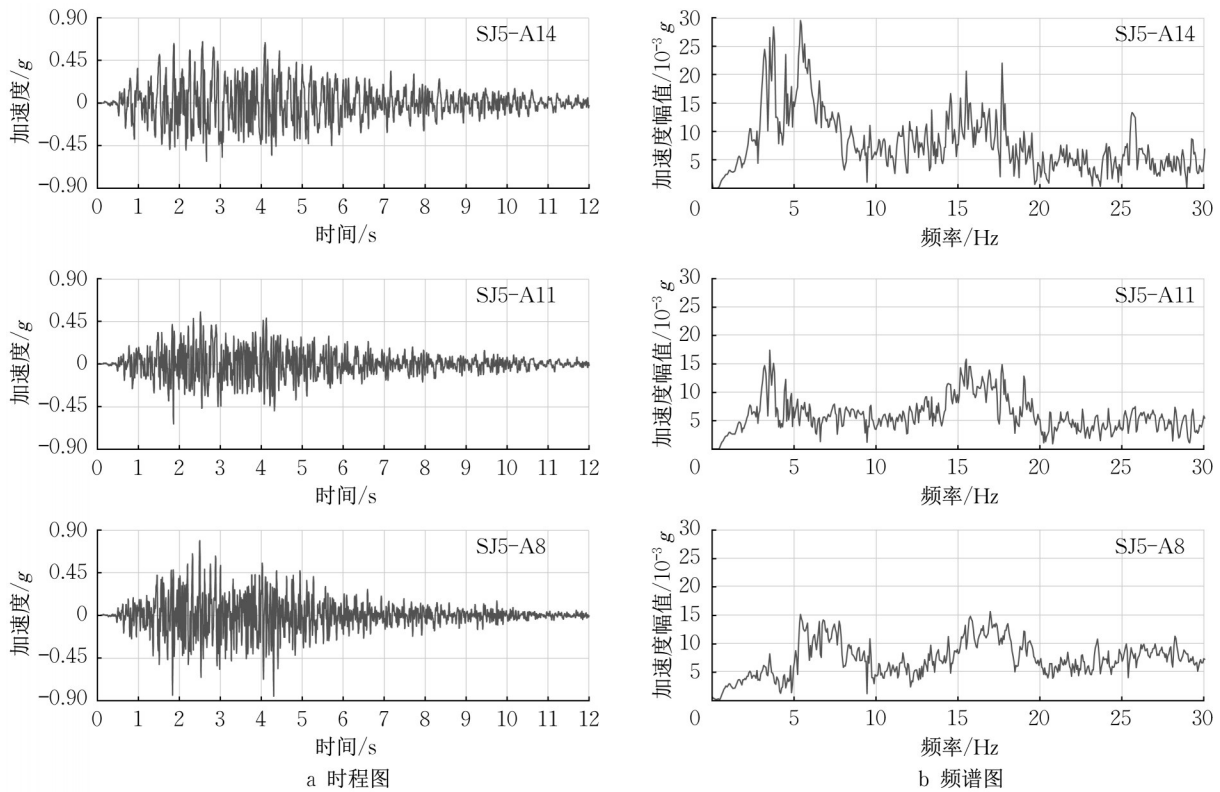


图 8 SJ5 工况下土体加速度时程图与频谱图

Fig. 8 Soil acceleration time-history and corresponding Fourier spectrum in SJ5 case

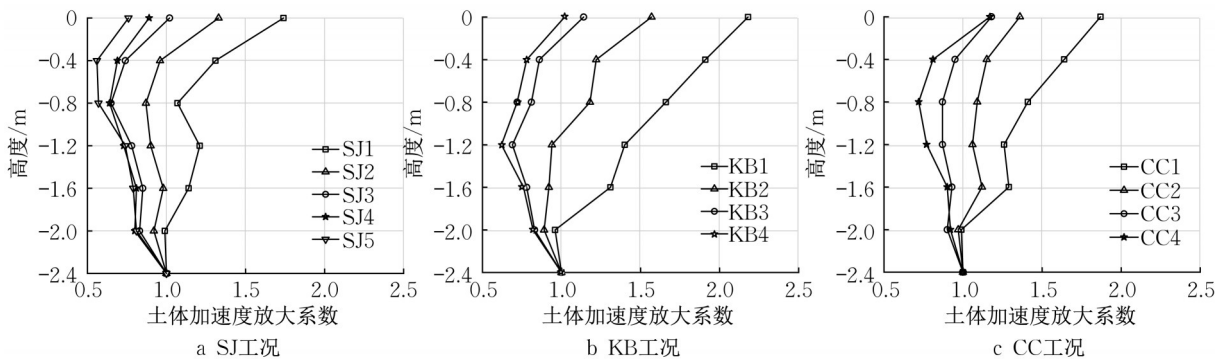


图 9 土层加速度放大系数

Fig. 9 Soil acceleration magnification factor

发生转动、平移等变形,特别是当土体较软时,基础的变形对整个体系的动力特性会产生很大影响。表 3 列出了刚性地基模型 RS 和考虑 SSI 效应模型 PS 的 X 向前 3 阶频率。从表中可以得出:未加载时,RS 模型的 X 向前 3 阶频率分别为 2.00、6.69、12.50 Hz,而 PS 模型的 X 向前 3 阶频率分别为 1.50、4.56、9.44 Hz,考虑 SSI 效应后结构频率出现了显著的下降。而且未加载时 PS 模型的阻尼比为 4.30%,比 RS 模型的阻尼比 3.50%提高了 22.86%,说明 SSI 效应对结构阻尼比的增加较为明显。

第 1 级加载后,RS 模型的频率出现了显著的下降,由 2.00 Hz 降至 1.44 Hz,而 PS 模型频率下降幅度相对较小,由 1.50 Hz 降至 1.38 Hz,从而下降后两者的频率接近。试验过程中结构的质量几乎不变,频率下降主要由结构的刚度降低引起,而结构的刚度降低可以一定程度反映结构的受损程度。1 级加载后 RS 模型频率下降较大,说明其结构损伤较大;而 PS 模型频率下降小,说明其结构损伤小。在 1 级加载后,虽然两模型频率接近,但已处于不同的损伤状态。同时,从阻尼比变化上看,RS 模型的阻尼比由 3.50% 上升到了

表3 RS模型和PS模型X向前3阶频率
Tab. 3 First three frequencies of RS and PS models

工况	结构						土体			
	频率/Hz			频率/Hz			阻尼比/%		频率/Hz	阻尼比/%
	RS		PS	RS		PS	PS	PS		
1阶	2阶	3阶	1阶	2阶	3阶	1阶	1阶	1阶	1阶	
WN1	2.00	6.69	12.50	1.50	4.56	9.44	3.50	4.30	5.36	9.20
WN2	1.44	4.50	9.13	1.38	4.50	9.19	6.40	4.90	5.30	7.90
WN3	1.13	3.13	7.31	1.25	3.56	7.63	9.50	4.80	5.02	8.10
WN4	0.88	2.50	5.75	0.81	2.38	5.00	11.20	7.10	4.92	9.30
WN5	0.75	2.06	5.13	0.56	1.75	4.19	14.40	11.60	4.94	8.00
WN6	0.63	1.88	4.38	0.56	1.75	4.13	15.70	11.60	4.91	8.20
WN7	0.63	1.81	4.06	—	—	—	16.20	—	—	—

6.40%，而PS模型的阻尼比基本保持不变。阻尼比的上升同样来自结构损伤的发展，模型混凝土损伤开裂后，裂缝面的错动和碰撞都起到了一定的耗能作用，增加了结构的阻尼，从而阻尼比上升。

第2级加载后，RS模型频率进一步降低，由1.44 Hz降至1.13 Hz，但降低幅度较第1级加载小；而PS模型频率的降低幅度与第1级相当，由1.38 Hz降至1.25 Hz，因此加载后，PS模型频率略高于RS模型。从趋势上看，RS模型的刚度损失速度减缓，而PS模型的刚度损失速度不变。同时，由于RS模型损伤的发展，其阻尼比进一步上升至9.50%，而PS模型由于损伤依然较小，阻尼比变化不明显。

第3级加载后，RS模型频率下降，由1.13 Hz降至0.88 Hz，但降低速度进一步减缓；而PS模型频率由1.25 Hz降至0.81 Hz，降低幅度超过了RS模型，频率降速也加快，导致加载后PS模型的频率低于RS模型。同时，由于RS模型损伤的进一步发展，其阻尼比由9.50%上升至11.2%，但升速降低；PS模型的阻尼比也开始上升，由4.8%上升至7.1%。

第4级加载结果类似第3级，RS模型频率由0.88 Hz降至0.75 Hz，阻尼比由11.20%升至14.40%；PS模型频率由0.81 Hz降至0.56 Hz，阻尼比由7.10%升至11.60%。在这两级加载中PS模型的结构损伤发展加快，而RS模型的结构损伤发展速度呈现减缓趋势。

第5级加载后，RS模型频率进一步降低，阻尼比上升，降低和上升幅度再次减小；而由于PS模型只加载了SJ5工况，未加载KB5和CC5工况，其频率和阻尼比几乎不变。

从频率和阻尼比的变化程度上看，随着工况逐级加载，考虑了SSI效应结构的损伤比刚性地基结构出现的更晚，发展也更慢，说明SSI效应对结构起到了一定的减震作用。

4.2 振型

根据试验测得的楼层加速度对结构的振型进行了识别。RS模型的X向前3阶振型如图10所示。

从图中可以得出：该振型形状是典型的高层建筑结构的单方向前3阶平动振型。从振型变化看，随着试验逐级加载，结构损伤不断地累积，RS模型的中上楼层的响应在相对加强，而中下楼层的响应在相对减弱。

PS模型的X向前2阶振型和土体频率(约5 Hz)处的振型如图11所示，可以得出：PS模型的X向前2阶振型形状基本与RS模型一致，由于前2阶振型频率明显小于土体频率，该频率处土体的响应相对较小，此时SSI体系的振型主要表现为上部结构的响应，土体对振型的影响很小。从振型的变化看，PS模型的X向前2阶振型变化也与RS模型类似，随着试验逐级加载，结构损伤不断地累积，中上楼层的响应在相对加强，中下楼层的响应在相对减弱。

从图11 c土体频率处振型看，此时土体的响应非常明显，大多数振型幅值在土体表面处达到最大值，说明在土体频率处，SSI体系的振型受土体影响显著，其振型幅值分布明显有别于刚性地基结构。从上部结构振型形状看，WN1~WN3工况下，土体频率处主要激发出上部结构的前2阶振型；WN4~WN5工况下，土体频率处主要激发的是上部结构的第3阶振型。

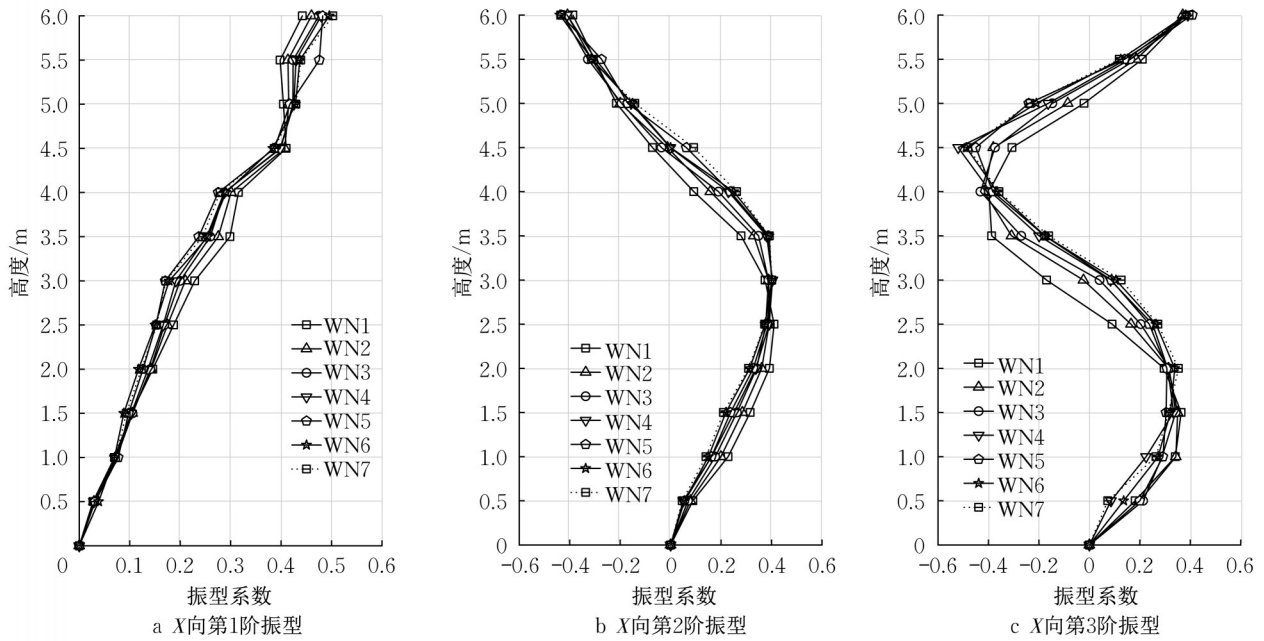


图10 RS模型X向前3阶振型

Fig. 10 First three mode shapes of X-direction of RS model

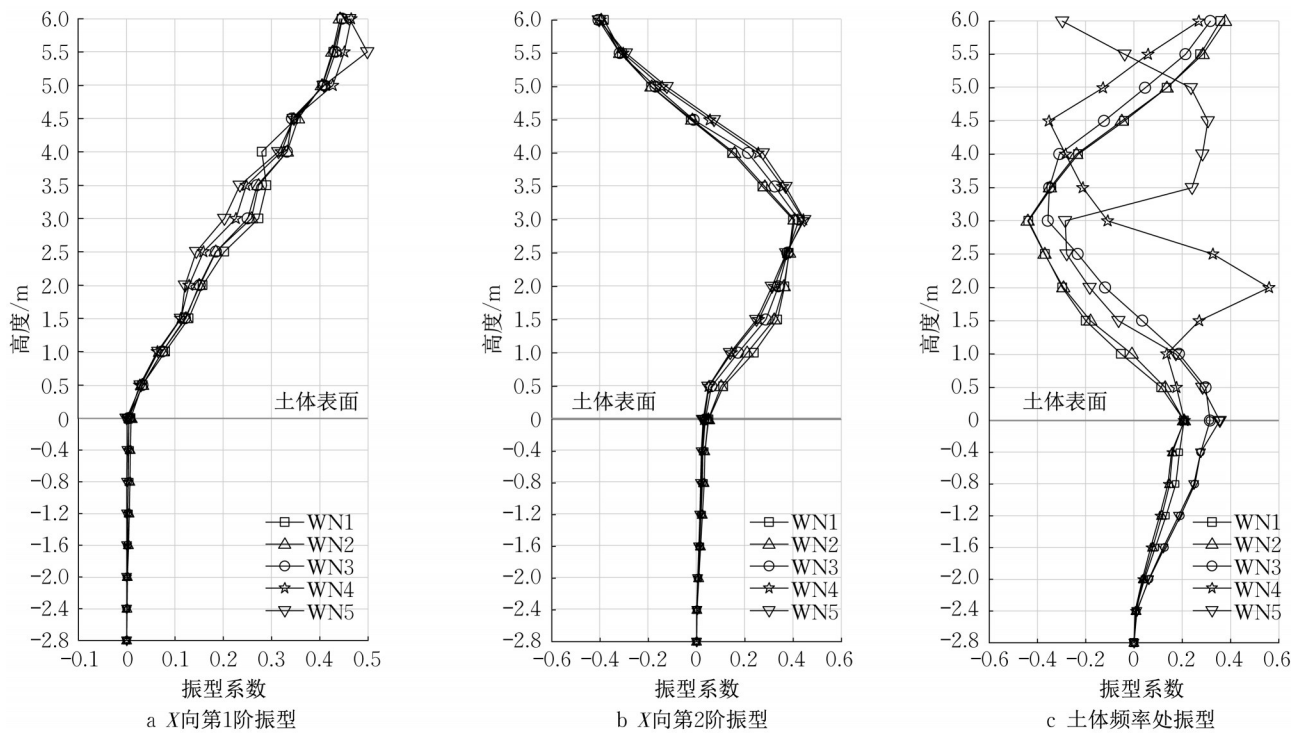


图11 PS模型X向前2阶振型和土体频率处振型

Fig. 11 First two mode shapes of X-direction and mode shape at soil frequency of PS model

5 结论

通过对比考虑SSI效应的框架模型和刚性地基框架模型的结构动力特性和地震响应,总结出本试验中SSI效应对高层框架结构有如下影响:

(1)软土对地震动存在显著的过滤作用,从频率

看主要表现出放大土体基频附近的振动,一般而言放大幅度随地震动加强而减小,从时域看小震时土体对加速度峰值起放大作用,而在大震时一般有减小峰值的作用;

(2)考虑SSI效应后,结构的频率降低,阻尼比提高。从频率和阻尼比的变化曲线看,随着工况逐

级加载,考虑了SSI效应结构的损伤比刚性地基上的结构出现的更晚,发展也更慢。说明SSI效应对结构起到了一定的减震作用;

(3)在土体频率处,SSI体系的振型受土体影响显著,其振型幅值分布明显有别于刚性地基结构;在远离土体频率处,SSI体系振型与刚性地基一致。随着逐级加载,上部结构频率变化,土体频率处激发的上部结构振型也相应改变。

作者贡献声明:

杨金平:试验方案制定,数据处理与分析,论文撰写。

李培振:参与研究的构思和设计。

吴雯:论文修订。

参考文献:

- [1] DURANTE M G, DI SARNO L, MYLONAKIS G, *et al.* Soil-pile-structure interaction: Experimental outcomes from shaking table tests [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2016, 45(7): 1041.
- [2] 施卫星,王梁坤,王洪涛,等.自调频调谐质量阻尼器及其减振性能试验[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 751.
SHI Weixin, WANG Liangkun, WANG Hongtao, *et al.* Experimental study of effect of controlling vibration of self-adjustable tuned mass damper [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(6): 751.
- [3] 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.
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.
- [4] 李培振,程磊,吕西林,等.可液化土-高层结构地震相互作用振动台试验[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(4): 467.
LI Peizhen, CHENG Lei, LU Xilin, *et al.* Shaking table testing on high-rise buildings considering liquefiable soil-structure interaction [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(4): 467.
- [5] 蒋玉敏,钱德玲,张泽涵,等.框架-核心筒结构与地基基础动力相互作用振动台试验研究[J].*建筑结构学报*, 2016, 37(2): 34.
JIANG Yuming, QIAN Deling, ZHANG Zehan, *et al.* Shaking table tests on dynamic interaction of frame-core tube structure and subgrade [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(2): 34.
- [6] 于旭,庄海洋,朱超,等.软夹层地基上多层隔震结构模型振动台试验研究[J].*振动与冲击*, 2015, 34(242): 104.
YU Xu, ZHUANG Haiyang, ZHU Chao, *et al.* Shaking table tests on the modal of a multi-story isolated structure on the ground with softer interlayer [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(242): 104.
- [7] 赵学斐,王曙光,王海,等.考虑土-结相互作用的黏滞阻尼器减震结构振动台试验研究[J].*振动与冲击*, 2017, 36(13): 146.
ZHAO Xuefei, WANG Shuguang, WANG Hai, *et al.* Shaking table tests for structures with viscous dampers considering SSI effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(13): 146.
- [8] 潘旦光,高莉莉,靳国豪,等.结-土-结构体系动力特性的模型实验[J].*北京科技大学学报*, 2014, 36(12): 1720.
PAN Danguang, GAO Lili, JIN Guohao, *et al.* Model test of the dynamic characteristics of a structure-soil-structure system [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(12): 1720.
- [9] 王海,鞠三,刘伟庆,等.土-结构相互作用对消能减震结构动力特性的影响[J].*南京工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(5): 1.
WANG Hai, JU San, LIU Weiqing, *et al.* Effects of soil-structure interaction on dynamic characteristics of energy dissipating structures [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 34(5): 1.
- [10] JABARY R N, MADABHUSHI G S P. Tuned mass damper positioning effects on the seismic response of a Soil-MDOF-Structure system [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2018, 22(2): 281.
- [11] FORCELLINI D. Analytical fragility curves of shallow-founded structures subjected to soil-structure interaction (SSI) effects [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021 (11). DOI: 10.1016/j.soldyn.2020.106487.
- [12] MA X H, CHENG Y M, AU S K, *et al.* Rocking vibration of a rigid strip footing on saturated soil [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(6): 928.
- [13] 楼梦麟,王文剑,朱彤,等.桩基础上结构TMD控制的振动台模型试验研究[J].*同济大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(6): 636.
LOU Menglin, WANG Wenjian, ZHU Tong, *et al.* Shaking table model test for TMD control of structure resting on pile-foundation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2001, 29(6): 636.
- [14] YANG J P, LI P Z, LU Z. Large-scale shaking table test on tall buildings with viscous dampers considering pile-soil-structure interaction [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220, 110960.
- [15] ABD-ELHAMED A, MAHMOUD S. Simulation analysis of TMD controlled building subjected to far- and near-fault records considering soil-structure interaction [J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 26: 100930.
- [16] YANG J P, LU Z, LI P Z. Large-scale shaking table test on pile-soil-structure interaction on soft soils [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2019, 28(18). DOI: 10.1002/tal.1679.