

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111017

考虑土-结构相互作用的软钢阻尼器作用效果分析*

杨金平¹, 孙开心¹, 李培振², 静行¹

(1. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了研究土-结构相互作用 (SSI) 对设置金属阻尼器框架结构的影响规律, 本文设计实现了考虑 SSI 的设置开孔式加劲阻尼器体系的框架结构振动台模型试验。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。本文完成了 1:6 比例的高层结构一桩—土动力相互作用体系 (PSSI)、设置金属阻尼器的 PSSI 体系以及刚性地基上框架结构和刚性地基上设置金属阻尼器的框架结构共 4 个模型振动台试验。从动力特性、地震响应等方面对比分析了纯框架与消能减震结构的差别。并通过计算减震率, 分析了 SSI 效应对消能减震结构减震效果的影响规律。结果表明: 消能减震结构在同样的地震作用加载下, 频率衰减幅度降低为纯框架的 1/3~1/2, 阻尼比增加幅度为纯框架的 1/2 左右, 结构的损伤程度明显减弱, 阻尼器起到了显著的减震效果。SSI 体系消能减震结构的阻尼器减震效率下降, 但 SSI 的减震效果加强, 综合来看, 其减震率依然高于刚性地基结构。

关键词: 土-结构相互作用; 振动台试验; 金属阻尼器; 软土地基; 减震率

中图分类号: TU4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0494-08

Efficiency Analysis of Metal Dampers Considering Soil-structure Interaction

YANG Jinping¹, SUN Kaixin¹, LI Peizhen², JING Hang¹

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this study, a shaking table model test was performed on the stiffening damper system with opening holes considering the soil-structure interaction (SSI) to investigate the efficiency of metal dampers. The layered shear box was designed to simulate the soil boundary, with a mixture of sawdust and sand serving as the foundation soil. A 12-storey reinforced concrete frame structure was constructed to simulate the superstructure. The foundation was a 3×3 pile group. Four shaking table model tests were carried out, including the 1:6 scale high-rise soil-pile-structure dynamic interaction system, the same system equipped with metal dampers, the frame structure under a fixed-base condition, and the frame structure equipped with metal dampers under a fixed-base condition. The differences between the pure frame and the energy dissipation and shock absorption structures are compared with each other and are analyzed in terms of their dynamic characteristics and seismic responses. By calculating the damping rate, the influence law of SSI effect on the damping effect of the energy dissipation and damp-

* 收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978524, 52108134)资助

作者简介: 杨金平(1988—), 女, 讲师, 博士。主要从事结构抗震研究。E-mail: jping_yang@haut.edu.cn

ing structure is analyzed. The results show that under identical earthquake loading, the frequency attenuation of the energy dissipation structure is reduced to 1/3~1/2 of that of the pure frame, and the damping ratio is increased to about 1/2 of that of the pure frame. The damage degree of the structure is greatly mitigated, and the dampers have a significant damping effect. Although the damping efficiency of metal dampers in SSI system decreases, the damping effect of soil-structure interaction is strengthened. Generally, the damping rate of the SSI system remains higher than that of the fixed-base condition.

Keywords: soil-structure dynamic interaction; shaking table test; energy dissipation; metal damper; soft soil; damping rate

0 引言

地震是严重威胁人类生命和财产安全的自然灾害之一。最近一百年来,世界各地死亡人数逾万人的地震,据不完全统计有约 20 次^[1]。近几十年来,世界各国的学者与工程师们不断致力于结构地震反应控制技术的研究。

随着结构振动控制技术的深入发展,20 世纪 90 年代初,土—结构动力相互作用被作为一个重要影响因素而在结构控制理论研究中加以考虑^[2-4]。随后,国内外学者在这一领域开展了广泛而深入的研究。楼梦麟等^[5-6]研究了土—结构相互作用 (SSI) 对高层、高耸结构风振相应 TMD 控制的影响,得知 SSI 对风振响应 TMD 控制效率有一定的影响。陈国兴等^[7]完成了考虑 SSI 的结构减震控制大型振动台模型试验,得出 SSI 效应使得基于刚性地基假定下设计的 TMD 减震控制系统在柔性地基条件下的控制效果不太理想,甚至会出现负面效应的结论。杨宏等^[8]利用弹性半空间假定,得出土与结构相互作用对结构主动控制效果有一定影响。邹立华等^[9]建立了考虑桩—土—结构相互作用 (PSSI) 的计算模型,考虑 PSSI 后结构地震响应有所加大,控制效果有所降低,最大控制力增大。王海等^[10]建立了土—消能减震结构相互作用体系的运动方程,采用复模态理论研究了减震结构动力特性,研究表明:考虑 SSI 后,非减震结构体系随着土体剪切波速的下降会加大整个体系的第一模态阻尼比;与普通结构相比,减震结构更需要考虑 SSI 效应对其产生的不利影响。

金属阻尼器将结构振动的部分能量通过金属的屈服滞回耗能来耗散掉,从而达到减震的目的。金属应具有屈服点低、滞回特性稳定、低周疲劳特性好、长期性能稳定以及耗能原理清晰等特点^[11]。

本文采用的软钢阻尼器即为一种金属弯曲型耗能装置,其通过钢板的面外受弯屈服变形消耗地震能量,该阻尼器构造简单、力学模型明确、造价低廉,有广阔的应用前景。然而对于带被动消能减震器的 PSSI 体系振动台试验研究与分析非常少,大多还停留在理论阶段,还存在着不足,需要进一步研究。为了验证理论模拟的正确性,有必要进行振动台试验。通过带软钢阻尼器的 PSSI 体系的振动台模型试验研究,探讨 PSSI 对软钢阻尼器工作效率的影响机理及规律;为建立有效的数值模拟方法提供必要的实验数据。

1 振动台试验介绍

1.1 试验内容

本文进行了刚性地基上框架结构、刚性地基上带金属阻尼器的框架结构以及考虑 SSI 效应的框架结构、考虑 SSI 效应的设置金属阻尼器的框架结构振动台试验,试验内容见表 1。图 1 为试验模型照片和金属阻尼器照片。

表 1 试验内容
Table 1 Test contents

序 号	试验 编号	模型比	试验内容	工况数
1	RS6	1/6	刚性地基、上部 12 层框架结构	25
2	RM6	1/6	刚性地基、上部 12 层带金属阻尼器的框架结构	25
3	PS6	1/6	柔性土箱、上部 12 层框架结构、2.8 m 土层、桩长 2 m	19
4	PM6	1/6	柔性土箱、上部 12 层带金属阻尼器的框架结构、2.8 m 土层、桩长 2 m	25

注:R 表示刚性地基;P 表示桩基;S 表示 12 层框架结构;M 表示 12 层带金属阻尼器的框架结构;6 表示缩尺比例为 1/6

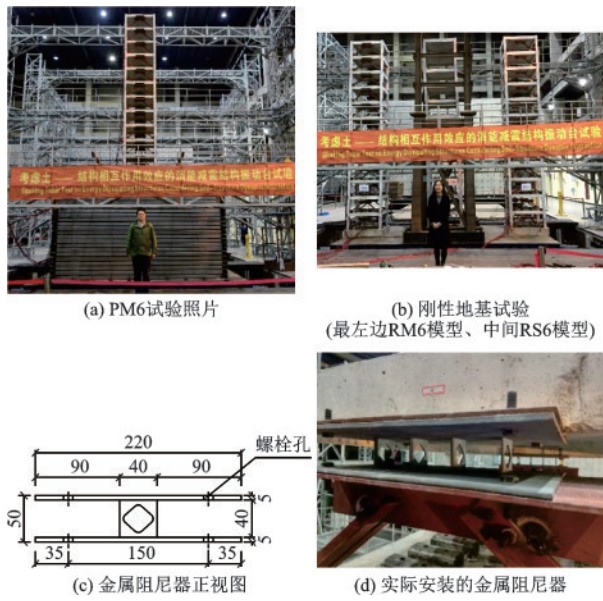


图1 试验模型和阻尼器示意
Fig.1 Photographs of the test model and metal dampers

1.2 测点布置及量测

试验中采用加速度计、应变传感器量测上部结构、基础和地基土体的动力响应,在金属阻尼器的两个斜撑上布置应变传感器用以计算金属阻尼器的出力,在桩上布置土压力计量测桩土界面的接触压力。本试验采用防潮加速度计来解决防水问题,而且用扎带将加速度计固定在铁丝网上。振动台试验中模型结构的测点布置参照文献[12]。

1.3 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(SJ)、Kobe波(KB)和Chi-Chi波(CC)。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。

2 动力特性

图2为RS6模型、RM6模型、PS6模型和PM6模型的1阶频率和1阶阻尼比随加载的变化曲线。

软钢阻尼器及其支撑可为框架结构提供一定的抗侧刚度,因此与纯框架结构相比,消能减震结构的1阶频率均有显著的提高。RM6模型频率由

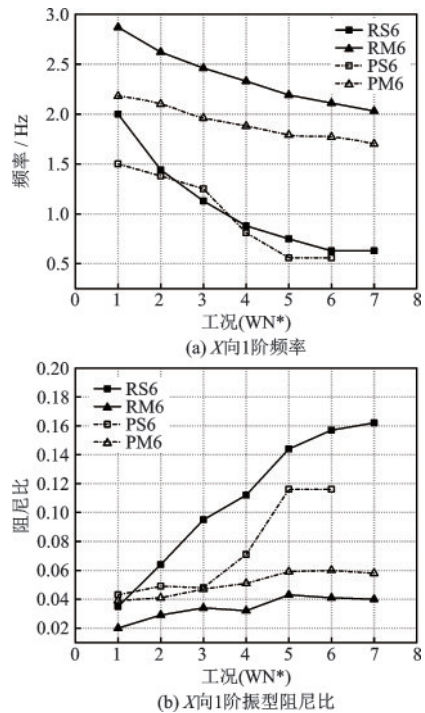


图2 4个模型的X向1阶频率及阻尼比

Fig.2 Frequency and damping ratios of four models in the X-direction

2.00 Hz提高到2.87 Hz,涨幅44%;PM6模型频率由1.50 Hz提高到2.18 Hz,涨幅45%。

从频率衰减看,消能减震结构的频率衰减幅度明显小于纯框架结构。加载结束后,RS6模型频率由2.00 Hz衰减为0.63 Hz,衰减幅度达69%;RM6模型频率由2.87 Hz衰减为2.03 Hz,衰减幅度为29%;PS6模型频率由1.50 Hz衰减为0.56 Hz,衰减幅度达63%;PM6模型频率由2.18 Hz衰减为1.70 Hz,衰减幅度为22%;可见,消能减震结构在同样的地震作用加载下,频率衰减幅度降低为纯框架的1/3~1/2,结构刚度损失显著降低,说明结构的损伤程度也明显减弱,阻尼器起到了显著的减震效果。

3 减震率分析

采用减震率来评价软钢阻尼器对结构的消能减震作用的大小,减震率的定义公式如下:

$$\text{减震率} = \frac{\text{纯框架的地震响应} - \text{消能减震结构的地震响应}}{\text{纯框架的地震响应}} \times 100\% \quad (1)$$

减震率反应了安装软钢阻尼器后在相同的工

况下地震响应降低的程度。减震率大于零时,表明软钢阻尼器起到了减震作用,且减震率越大,减震效果越强,反之则越弱;减震率小于零时,表明软钢阻尼器加强了结构的地震响应。

3.1 楼层剪力

楼层剪力是衡量地震作用大小的一个重要指标,层剪力减震率反应了软钢阻尼器对结构的剪力响应的降低作用大小。图3为各楼层的柱底总剪力减震率曲线。

从楼层分布看,底部楼层的减震率普遍较小而上部楼层的减震率较大。剪力减震率在中下部楼层的部分工况出现了小于0的现象,说明此时消能减震结构的楼层剪力响应反而变大了。这主要

是因为安装阻尼器后周期变短,导致反应谱对应点左移,地震作用加强。

从数值大小看,大部分工况中层剪力减震率大于零,说明软钢阻尼器有效地降低了结构的层剪力响应。与RM6模型相比,PM6模型的层剪力减震率普遍更大,说明安装了软钢阻尼器后,PM6模型有更好的减震效果。PM6模型的减震效果主要由阻尼器的减震效果和SSI效应的减震效果两部分构成。从平均值看,依然是PM6的减震率较RM6模型更大,减震效果更好。

综上,软钢阻尼器对结构的层剪力有普遍的减震效果。一般而言,上部楼层的层剪力减震效果要好于下部楼层,SSI体系的层剪力减震效果要好于刚性地基结构。

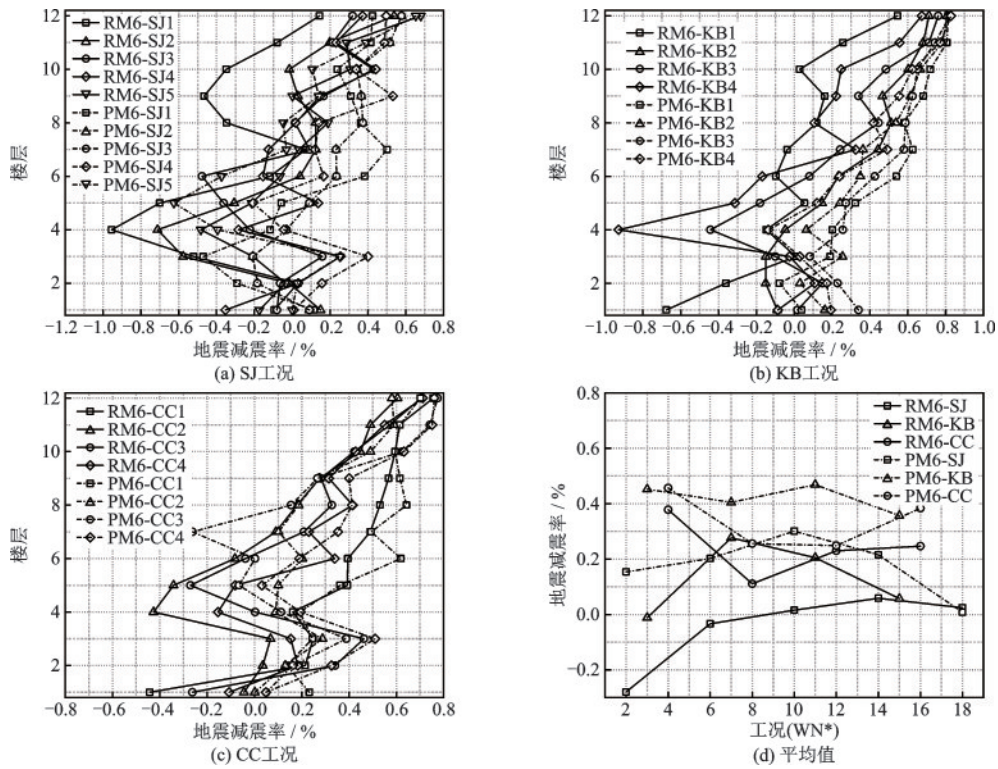


图3 RM6模型和PM6模型的楼层柱底总剪力减震率

Fig.3 Damping rates for total base shear forces of columns in the RM6 and PM6 models

3.2 楼层弹性位移

图4为各工况下楼层弹性位移减震率曲线。从数值大小看,除了个别工况,位移减震率均大于零,软钢阻尼器对结构的位移响应起到了减震效果。同一工况作用下,PM6的位移减震率要显著大于RM6模型,且随着地震作用加强,差距增大,说明考

虑SSI效应的消能减震结构比刚性地基的消能减震结构减震效果更加明显。

考虑SSI效应的消能减震结构的减震作用一方面来自软钢阻尼器提供的额外阻尼,另一方面来自SSI效应的减震效果,而SSI效应的减震效果与结构和土的动力特性有关。软钢阻尼器提供的刚度显著改变了结构的动力特性,因此减震结构的SSI

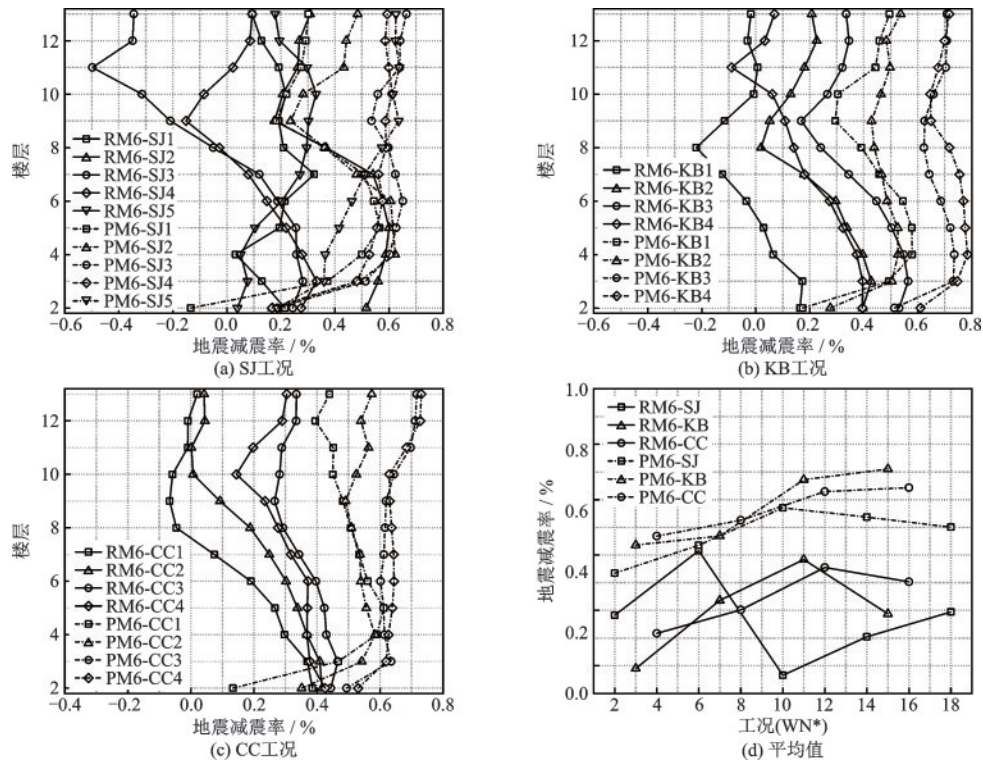


图4 RM6模型和PM6模型的楼层弹性位移减震率

Fig.4 Damping rates for elastic displacements of floors in the RM6 and PM6 models

效应与纯框架也不同。从桩基应变可知,PM6模型的SSI效应比PS6模型要明显得多,从而其SSI效应的减震效果也更显著。

从楼层分布看, RM6模型的中下层位移减震率较大,而中上层位移减震率相对较小; PM6模型除了底层的位移减震率较小外,其他楼层的位移减震率分布较为均匀。

从平均值看, RM6模型的平均位移减震率主要分布在0~40%,随着地震作用加强,表现为先增后减的变化趋势; PM6模型的平均位移减震率主要分布在30%~70%内,随着地震作用加强,减震率上升。

综上,软钢阻尼器对结构的楼层位移有普遍的减震效果。对刚性地基而言,中下部楼层的减震效果要好于中上部楼层;对SSI体系而言,底层的减震效果较差,其他楼层减震效果相当。从数值上看,SSI体系的减震效果要显著优于刚性地基结构,其差别是阻尼器减震效果和SSI减震效果的综合。

3.3 层间位移角

图5为各工况下层间位移角减震率曲线。从数

值大小看,大部分工况的大部分楼层层间位移角减震率主要分布在20%~80%,软钢阻尼器发挥了很好的减震作用,但RM6模型的5、6层处出现了层间位移角减震率小于零的情况,层间位移角有所放大。PM6模型的层间位移角减震率要明显大于RM6模型,随着地震作用加强,两模型的减震率都上升,但是PM6模型的上升幅度更大,因此两模型的减震率差距也在扩大。

从楼层分布看, RM6模型的中下部楼层和中上部楼层的层间位移角减震率较高,而中部楼层则较低甚至出现小于0的情况。PM6模型的层间位移角减震率同样表现为中下部楼层和中上部楼层较高,而中部楼层稍差。因为纯框架结构的损伤主要出现在中上部和中部楼层,随着损伤的发展,结构楼层刚度降低,层间位移角增加,但对于消能减震结构,结构损伤分布均匀,因此层间位移角分布均匀。

3.4 楼层加速度

图6为各楼层的最大绝对加速度。从数值大小看, SJ波形作用时,两模型很大一部分楼层加速度

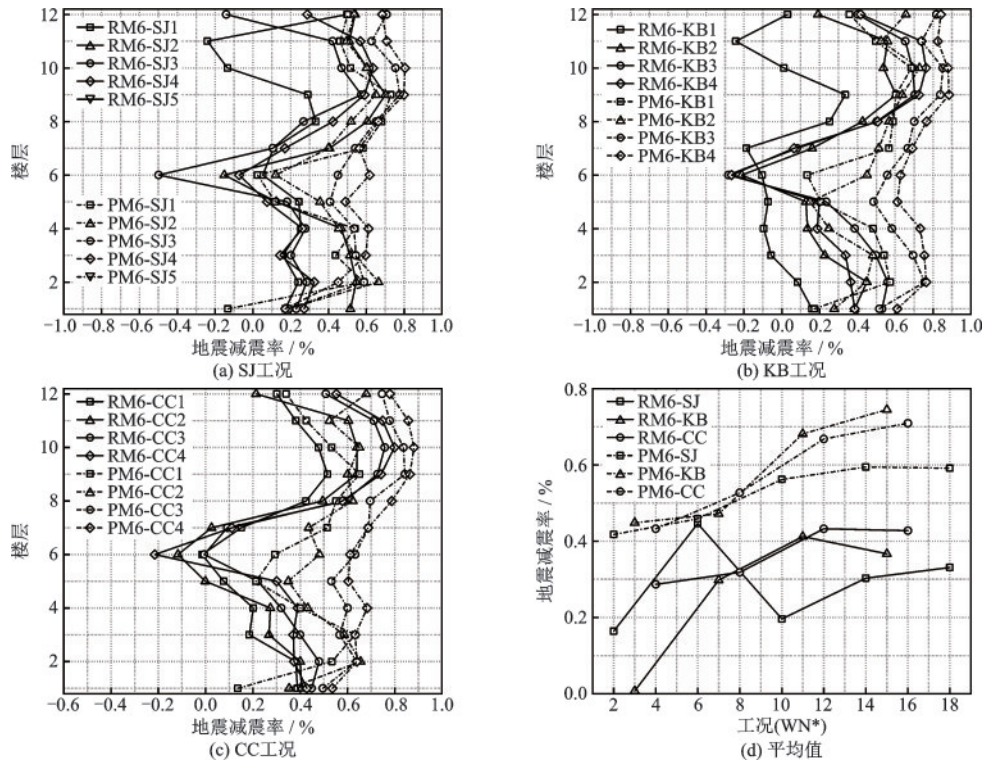


图5 RM6模型和PM6模型的层间位移角减震率

Fig.5 Damping rates for elastic inter-story displacement angles in the RM6 and PM6 models

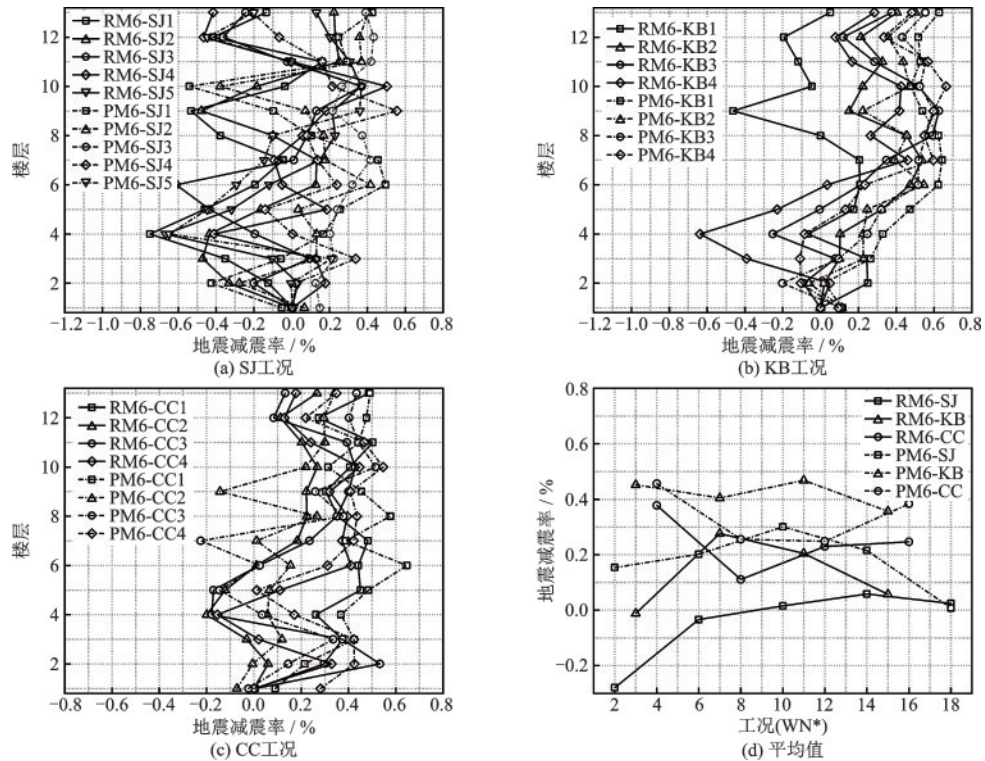


图6 RM6模型和PM6模型的楼层绝对加速度减震率

Fig.6 Damping rates for absolute acceleration of floors in the RM6 and PM6 models

减震率都小于0,说明软钢阻尼器加大了楼层的加速度响应;而KB波和CC波作用时,大部份楼层的

减震率都大于0,说明阻尼器发挥了一定的减震作用。这主要由于SJ波与KB波、CC波的频谱差异导

致的,由于SJ波是基岩波,其高频成分丰富,其反应谱曲线更窄更陡,意味着结构频率的差异导致的地震影响系数差别会更大,从而阻尼器引起的结构周期减小导致的地震作用增幅更大,因此与KB波和CC波相比,其减震率更小,甚至为负。同时可以发现,PM6模型的加速度减震率较RM6模型普遍更大,说明其阻尼器的加速度减震效果更好,与前面的结论基本一致。

综上所述,软钢阻尼器对结构的加速度减震效果与地震特性相关。一方面安装了阻尼器后结构周期减小,导致地震作用加强,另一方面阻尼器提供的附加阻尼可以减小地震响应。一增一减,综合得到软钢阻尼器的加速度减震率。同一条地震作用时,SSI体系的加速度减震率普遍优于刚性地基结构。

4 结 论

通过对比纯框架结构(RS6、PS6)与消能减震结构(RM6、PM6)的结构特性和地震响应及其对应的减震率,得出以下结论:

(1)消能减震结构在同样的地震作用加载下,频率衰减幅度降低为纯框架的 $1/3\sim 1/2$,阻尼比增加幅度为纯框架的 $1/2$ 左右,结构的损伤程度明显减弱,阻尼器起到了显著的减震效果。

(2)对于SSI体系,虽然PSSI体系的周期减小、地震作用加强,但同时由于上部结构的频率更接近土体频率,SSI效应也加强,使其减震效果加强,一增一减,综合表现为PSSI体系的楼层剪力较刚性地基上的模型降低。

(3)从加速度减震率、位移减震率和层间位移角减震率看,软钢阻尼器有普遍的减震效果。PSSI体系的减震效果优于刚性地基结构,这是由于PSSI体系阻尼器减震效果变差和SSI减震效果增强的综合效应所致。

参考文献:

[1] 胡聿贤.地震工程学[M].2版.北京:地震出版社,2007.

Hu Y X. Earthquake engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2007. (in Chinese)

[2] 凌贤长,王东升.液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验研究进展[J].地震工程与工程振动,2002,22(4):53-59.

Ling X C, Wang D S. Study on shaking table test for seismic interaction of pile-soil-bridge structure in case of soil liquefaction caused by earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 53-59. (in Chinese)

[3] 杨林德,杨超,季倩倩,等.地铁车站的振动台试验与地震响应的计算方法[J].同济大学学报,2003,31(10):1135-1140.

Yang L D, Yang C, Ji Q Q, et al. Shaking table test and numerical calculation on subway station structures in soft soil [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(10): 1135-1140. (in Chinese)

[4] 钱德玲,夏京,卢文胜,等.支盘桩-土-高层建筑结构振动台试验的研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):2024-2030.

Qian D L, Xia J, Lu W S, et al. Study of shaking table test of squeezed branch pile-soil-high-rise structure interaction system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2024-2030. (in Chinese)

[5] 楼梦麟,吴京宁.土-结构相互作用对高柔结构风振响应TMD控制的影响[J].计算力学学报,2001,18(2):189-193.

Lou M L, Wu J N. Influence of soil-structure interaction on TMD control of wind-induced vibration response of highly flexible structures [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(2): 189-193. (in Chinese)

[6] 吴京宁,楼梦麟.土-结构相互作用对高层建筑TMD控制的影响[J].同济大学学报,1997,25(5):515-520.

Wu J N, Lou M L. Influence of soil-structure interaction on Tuned Mass Damper control of high-rising buildings [J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(5): 515-520. (in Chinese)

[7] 陈国兴,王志华,宰金珉.考虑土与结构相互作用效应的结构减震控制大型振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2001,21(4):117-127.

Chen G X, Wang Z H, Zai J M. Shaking table model testing of structure suppressing vibration control includ-

- ing soil-structure interaction effects [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 117-127. (in Chinese)
- [8] 杨宏, 邹立华, 黄丽彬, 等. 土-结构相互作用对结构主动控制的影响研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(3): 98-101, 124.
Yang H, Zou L H, Huang L B, et al. Structure active control considering soil-structure dynamic interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(3): 98-101, 124. (in Chinese)
- [9] 邹立华, 方雷庆. 考虑桩-土-结构相互作用的结构振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2005, 29(11): 100-104.
Zou L H, Fang L Q. Structural vibration control considering pile-soil-structure dynamic interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 29(11): 100-104. (in Chinese)
- [10] 王海, 鞠三, 刘伟庆, 等. 土-结构相互作用对耗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): 1-6.
Wang H, Ju S, Liu W Q, 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): 1-6. (in Chinese)
- [11] 李钢, 李宏男. 新型软钢阻尼器的减震性能研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 66-72, 206.
Li G, Li H N. Study on vibration reduction of structure with a new type of mild metallic dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 66-72, 206. (in Chinese)
- [12] Yang J P, Lu Z, Li P Z. Large-scale shaking table test on pile-soil-structure interaction on soft soils [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2019, 28(18): 1679.
- (本文编辑: 苏泽云)



(上接第 483 页)

- [22] Song G H, Che D L, Li M H. Overturning axis selection in curved box-girder bridges with single-column piers [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1-9.
- [23] 周子杰, 阮欣, 石雪飞. 梁桥横向稳定验算中倾覆轴的选取[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 907-910.
Zhou Z J, Ruan X, Shi X F. Selection of overturning axis in lateral stability calculation of girder bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(5): 907-910. (in Chinese)
- [24] 袁摄桢, 戴公连, 吴建武. 单柱宽幅连续梁桥横向倾覆稳定性探讨[J]. 中外建筑, 2008(7): 154-157.
Yuan S Z, Dai G L, Wu J W, et al. Discuss the landscape orientation overturn stability of single post wide continued girder bridge [J]. Chinese and Overseas Architecture, 2008(7): 154-157. (in Chinese)
- [25] 郑旺辉. 后轮转向半挂汽车列车的轨迹偏差分析[J]. 系统工程与电子技术, 1994(6): 72-81.
Zheng W H. Analysis of track bias of the automobile train with rear wheel steering [J]. Systems Engineering and Electronics, 1994(6): 72-81. (in Chinese)