

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230527001

独立周期性基础的隔震性能研究

尤超凡, 王国波, 金阳彬

(温州大学建筑工程学院, 浙江温州 325035)

摘要: 固体物理学发现, 周期性结构具有独特的衰减域特性, 即处于衰减域频率范围内的弹性波无法在周期性结构中传播, 可将这一原理应用到土木工程的减隔震领域中。本文以四层框架结构为例, 采用数值分析的方法探讨由橡胶与混凝土组成的独立层状周期性基础的隔震效果, 其中考虑的主要因素包括: 地震动类型和幅值、橡胶层厚度与层数及弹性模量。对比分析表明: 独立周期性基础对高频地震波的隔震效果明显大于低频地震波; 随着地震波幅值的增加周期性基础的隔震性能逐渐下降; 材料参数对周期性基础的隔震性能起着决定性作用, 其中结构刚度随着橡胶层的厚度、层数增加而减小, 随橡胶弹性模量的增加而提高, 周期性基础对结构加速度的衰减最高可达53.2%。研究成果可为层状周期性基础的实际应用提供参考。

关键词: 周期性基础; 框架结构; 抗震性能; 隔震

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1072-12

Research on the Seismic Isolation Performance of Independent Periodic Foundations

YOU Chaofan, WANG Guobo, JIN Yangbin

(College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: Solid-state physics has revealed that periodic structures exhibit unique attenuation domain characteristics, where elastic waves within the attenuation frequency range cannot propagate through periodic structures. This principle can be applied to seismic isolation in civil engineering. Taking a four-story frame structure as an example, this paper employed numerical analysis to explore the isolation effect of an independent layered periodic foundation composed of rubber and concrete. The main influencing factors considered included the type and amplitude of seismic motion, rubber layer thickness, number of layers, and elastic modulus. Comparative analysis showed that the isolation effect of independent periodic foundations on high-frequency seismic waves was significantly stronger than on low-frequency seismic waves. As the amplitude of seismic waves increased, the isolation performance of the periodic foundation gradually decreased. Material parameters played a decisive role in the isolation performance, with structural stiffness decreasing as the thickness and number of rubber layers increased, and increasing with a higher rubber elastic modulus. The maximum attenuation in structural

* 收稿日期: 2023-05-27; 修回日期: 2023-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078386, 51878529)资助

作者简介: 尤超凡(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: 21461544078@stu.wzu.edu.cn

通信作者: 王国波(1979—), 男, 教授, 博士。主要从事工程结构动力响应方面的研究。E-mail: 20190337@wzu.edu.cn

acceleration due to periodic foundations reached up to 53.2%. The research results can provide valuable insights for the practical application of layered periodic foundations.

Keywords: periodic foundation; frame structure; seismic resistance; vibration isolation

0 引言

中国位于世界两大地震带—环太平洋地震带与欧亚地震带之间,是遭受地震频繁的国家之一。因此提高建筑物的减隔震性能是我国结构减隔震领域重点研究重要的研究方向。固体物理学领域研究发现周期性结构具有独特的衰减域特性,即处于衰减域频率范围内的弹性波无法在周期性结构中传播,这种现象被称之为禁带效应^[1-2]。如何利用新型周期性结构提高建筑结构的抗震性能已经成为结构减隔震领域研究的热门方向。

以周期性结构衰减域产生的原理为依据,可将其划分为散射型周期性结构^[3-4]和局域共振型周期性结构^[5-6]。两种结构的区别在于,在散射型周期性结构中,结构的周期性排列方式为影响结构衰减域的主要原因^[7-8];在局域共振型周期性结构中,单个散射体的自身振动特性为影响结构衰减域的主要因素^[9-10]。在衰减域理论的指导下,S. Brulé等^[11]在法国里昂完成了世界上第一个周期性隔震结构的现场足尺式验,证明了周期性结构应用于实际工程的可行性。

基于此,Z. F. Shi等^[12-13]首先提出了用橡胶和混凝土这两种常见的建筑材料组合成周期性隔震基础;在此基础上,X. Liu等^[14]研究了初始应力对层状周期性基础隔震性能的影响;J. Bao等^[15]对包括层状周期性基础在内三种不同类型的地基进行了动力响应分析,结果表明当地震波的卓越频率在层状周期性结构的衰减域频域范围内时,结构的加速度响应将大幅减小;为获得具有宽频带低频率的周期性基础,X. Liu等^[16]在传统层状周期性结构的基础上提出了复合型的组合层状周期性基础;C. F. Zhao等^[17]以上述理论模型为基础,设计了层状周期性基础的框架结构并进行了振动台试验,验证了层状周期性基础实际应用的可行性。

综上所述,经过合理设计得周期性结构可以有效地衰减地震波对建筑结构的破坏。然而,对于上述共识性结论以定性分析为主,定量分析较少,对于在不同工况下该如何设计周期性结构没有统一

的共识。因此,本文通过建立层状周期性基础与框架结构的有限元数值模型,分析周期性基础中关键参数对其隔震性能的影响,建议合理的周期性基础相关参数,从而指导工程实际。

1 计算方法的验证

为验证数值方法的合理性,以文献[16]中的组合型周期性结构模型为例,采用ABAQUS软件建立相应的单跨四层框架结构和基础,其几何尺寸与文献[16]相同,框架结构层高3 m,跨度6 m,梁截面为0.4 m×0.6 m,柱截面为0.5 m×0.5 m,板厚0.1 m。基础几何尺寸为:14 m(宽)×14 m(长)×3.39 m(厚),基础为橡胶和混凝土组成的层状周期性基础(图1)。混凝土和橡胶均采用弹性模型,计算参数均参照文献[16]选取,其中混凝土弹性模量为25 GPa,密度2 300 kg/m³,泊松比0.330,阻尼比为5%。橡胶弹性模量为0.137 MPa,密度1 300 kg/m³,泊松比0.463,阻尼比为30%^[18]。边界条件为:基础底部约束竖向(Z向,坐标方向参见图2(a))和纵向约束(Y向)位移,基础底部横向(X向)释放以输入Whittier Narrows地震波(图3),基础侧面自由。

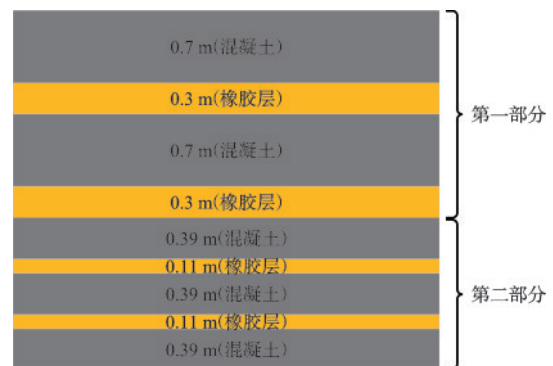
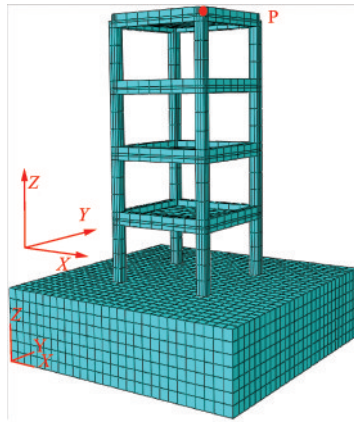


图1 组合层状周期性基础

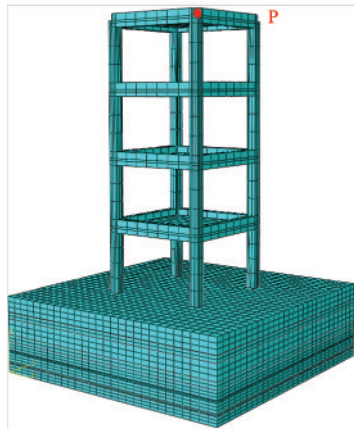
Fig.1 Combined layered periodic foundation

为了对比分析,建立了相同尺寸的纯混凝土基础(图2(a)),通过对比混凝土基础和周期性基础(图2(b))时框架结构P点的加速度响应,以检验组合周期性基础的隔震性能,并验证数值方法的合理性。

对比分析加速度、频率、框架层间相对位移,其



(a) 混凝土基础



(b) 周期性基础

图2 结构模型示意

Fig.2 Structural model diagram

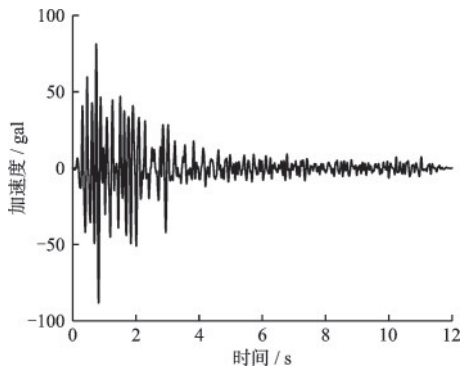


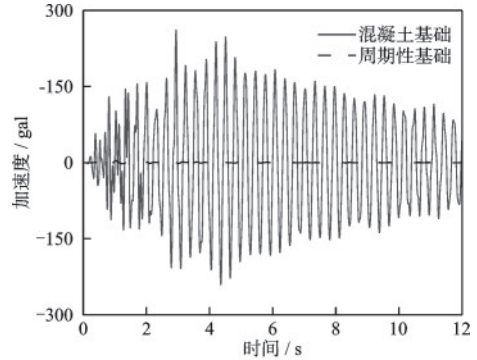
图3 Whittier Narrows波时程曲线

Fig.3 Time history curve of Whittier Narrows wave

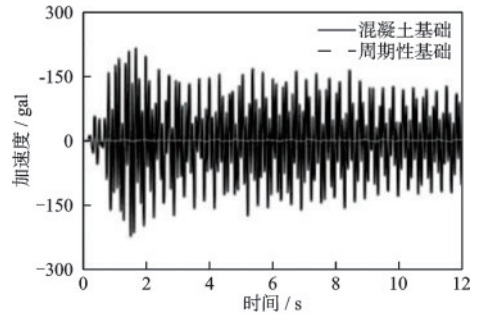
中图4和图5分别为框架P点加速度时程曲线和频谱图,图6为框架层间位移角。由图4~6可见:

(1)框架结构顶层的加速度时程曲线和频谱曲线在变化趋势上保持了较好的一致,只是幅值上稍有差异,主要原因在于文献[16]中没有提供橡胶层计算参数等部分关键参数;

(2)框架结构层间位移角沿高度的变化趋势也保持了较好的一致,仅是幅值上稍有差异。



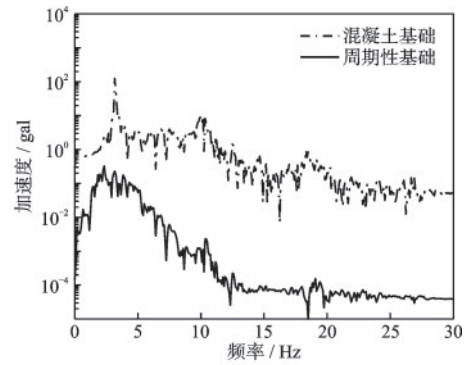
(a) 本文结果



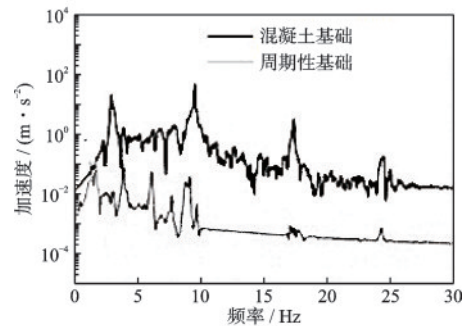
(b) 文献[16]结果

图4 P点加速度时程曲线

Fig.4 P-point acceleration time history curves



(a) 本文结果



(b) 文献[16]结果

图5 P点加速度频谱

Fig.5 P-point acceleration spectrum

由此验证本文数值方法的合理性,可用该方法进行足尺结构及周期性基础的减隔震效果分析。

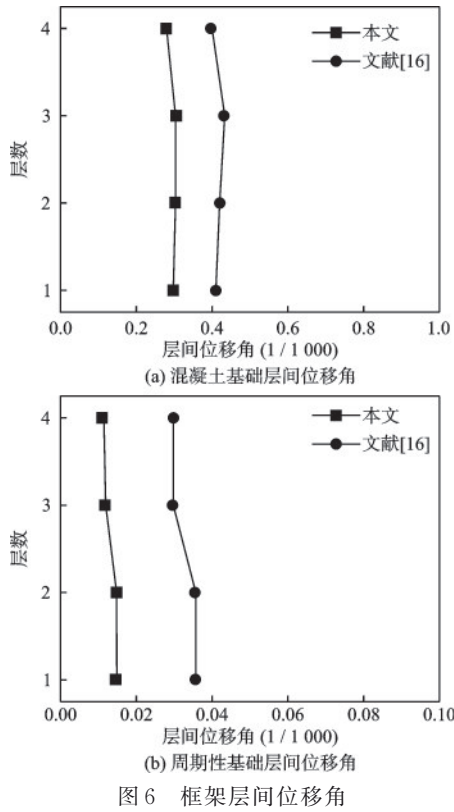


Fig.6 Inter-story displacement angle of frame

2 数值参数分析工况

考虑到结构层数较少,一般采用独立基础,因此本文仅考虑柱下独立基础,将第2节的整体基础调整为独立基础,独立基础之间相互没有连接,为方便计算其厚度取文献[16]中整体基础厚度尺寸的整数3 m,其横截面尺寸参考文献[19]为3 m×3 m,具体尺寸为:3 m×3 m×3 m,如图7所示。为分析结构的损伤情况,C30混凝土采用损伤本构模型(CDP),其他细节,如模型尺寸和计算参数同第2节。为研究层状周期性基础的减隔震性能,本文从周期性基础橡胶层的厚度、弹性模量、层数和输入地震动的类型、幅值等5个方面进行分析。地震动类型选择经典的EL波(用EL表示)、长持时的卧龙波(用WL表示)和NR脉冲波(用NR表示),参数设定见表1,输入地震动时程及频谱曲线如图8所示。本文采用单参数变化的方法进行对比分析,其中设定基准工况:周期性基础包含1层10 cm厚且弹性模量为0.5 MPa的橡胶层(图7(b)),在底部输入0.2g的EL波,具体工况见表2,其中分层橡胶的分布如图9所示。

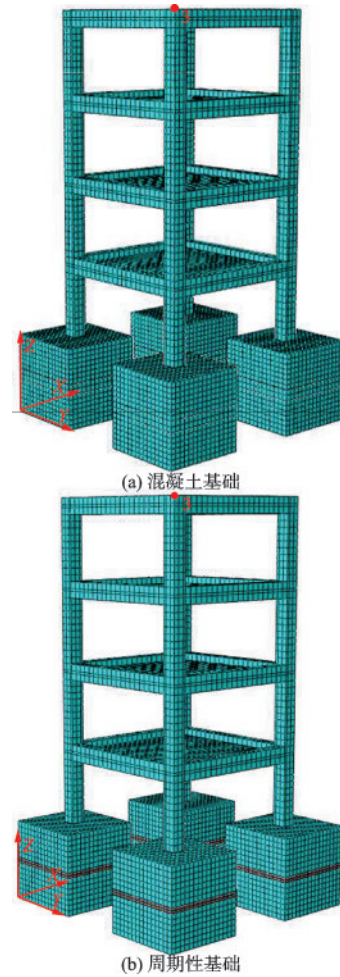


图7 独立基础模型

Fig.7 Independent foundation model

表1 参数分析以及符号表示

Table 1 Parameter analysis and symbolic representation

参数名称	符号表示	数值	单位
橡胶层厚度	H	10、20、40	cm
橡胶弹性模量	E	0.5、2、4	MPa
橡胶层数	N	1层、2层、3层	
地震波类型	T	EL、WL、NR	
地震波幅值	A	0.1gEL、0.2gEL、0.4gEL	m/s^2

表2 周期性基础参数分析工况表

Table 2 Periodic foundation parameter analysis conditions

参数名称	参数分析	其他参数
橡胶层厚度 H	20 cm	$E=0.5, N=1, 0.2gEL$
	40 cm	
橡胶弹性模量 E	2 MPa	$H=10, N=1, 0.2gEL$
	4 MPa	
橡胶层数 N	2	$E=0.5, H=10, 0.2gEL$
	3	
地震波类型 T	0.2gWL	$E=0.5, H=10, N=1$
	0.2gNR	
地震波幅值 A	0.1g/0.2gEL	$E=0.5, H=10, N=1$

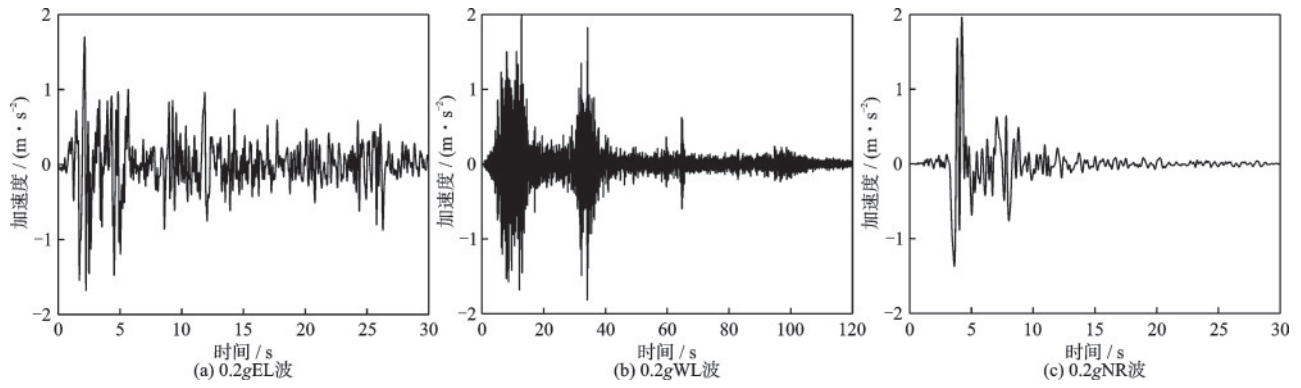


图8 输入地震波时程曲线

Fig.8 Input seismic wave time history curves

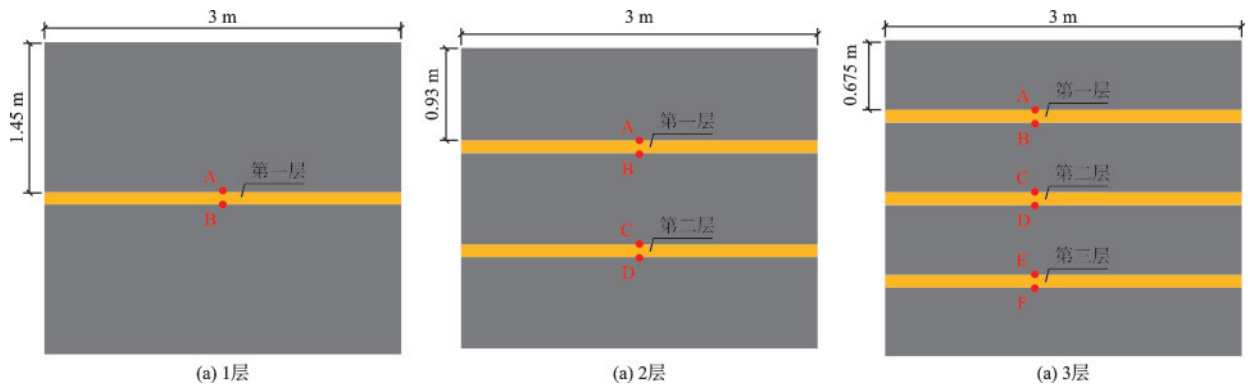


图9 包含 10 cm 厚橡胶层的周期性基础

Fig.9 Periodic foundation with a 10 cm thick rubber layer

3 模态分析

将基础底部全约束进行模态分析,表3为不同工况时框架结构的前5阶自振频率,为方便表达结构基频的变化规律,由公式(1)计算结构基频的变化率 $R^{[20]}$,各工况的计算结果见表3。由表3可见:

$$R = \frac{\text{混凝土基础基频} - \text{周期性基础基频}}{\text{混凝土基础基频}} \times 100\%$$

(1)

(1)结构频率随着橡胶层数的增多以及橡胶层厚度的增加而降低;结构频率随着橡胶弹性模量的增加而增加。这与基本的结构动力学原理是一致的,因为结构刚度随着橡胶层数和厚度的增加而降低,随着橡胶弹性模量的增加而增大。

(2)相比较于混凝土基础,橡胶层的加入在很大程度上降低了结构的刚度,从而降低了结构的频率,如基准工况的基频降低了18.3%,而橡胶层厚度为20 cm时基频仅1.40 Hz,相比混凝土基础降低了61.22%,也使得结构的基频更靠近于地震波主频。

表3 模型前5阶自振频率及基频的变化率

Table 3 The first 5 natural frequencies of the model and the rate of change of the fundamental frequency

单位:Hz

阶数	混凝土基础	基准工况	$H=10\text{ cm}, N=1$		$E=0.5\text{ MPa}, N=1$		$E=0.5\text{ MPa}, H=10\text{ cm}$	
			2 MPa	4 MPa	20 cm	40 cm	2层	3层
1阶及	3.61	1.78	2.84	3.20	1.40	1.02	1.43	1.21
变化率 $R/\%$	/	-50.6	-21.32	-11.36	-61.22	-71.75	-60.39	-66.48
2阶	3.70	1.78	2.85	3.21	1.40	1.02	1.43	1.21
3阶	5.11	1.78	3.56	4.47	1.78	1.37	1.78	1.60
4阶	5.12	1.79	3.56	5.04	1.78	1.78	1.78	1.78
5阶	5.13	1.80	3.57	5.04	1.78	1.78	1.78	1.78

4 瞬态分析

采用加速度衰减指数评价周期性基础的隔震性能^[20],加速度衰减指数D定义为:

$$D = \frac{A_p - A_c}{A_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中, A_p 和 A_c 分别为周期性基础和混凝土基础框架P点加速度峰值,由公式(2)可见衰减指数越大则表明隔震效率越高。

在关注结构加速度和相对变形的同时,周期性基础橡胶层的相对变形以及橡胶层的竖向压缩量同样值得关注,在橡胶层顶部和底部设置两个观测点A~F点(图9(c)),以分析橡胶的横向相对变形和竖向压缩量。

4.1 橡胶层厚度影响分析

本节以单层橡胶层的周期性基础为例,对比橡胶层厚度为10 cm(基准工况)、20 cm和40 cm的工况中框架的地震响应结果,分析橡胶层厚度对周期性基础隔震性能的影响。

4.1.1 结构加速度响应分析

不同橡胶层厚度下结构基频、顶部加速度幅值和衰减指数见表4,框架P点加速度时程曲线及频谱图如图10所示。从表4和图10可以看出:

(1)由于橡胶层的相对变形如同一个隔震层,橡胶层有较好的减隔震的功能,加速度最大衰减指数达到了53.2%;

(2)橡胶层厚度为20 cm时,结构顶部的加速度响应相对于10 cm的工况下反而有所放大,这是因为橡胶厚度为20 cm时,结构基频为1.40 Hz,此时与EL波主频(1.14 Hz)非常接近,可能导致结构发生共振而产生较大的动力响应。因此,建议在周期性结构的设计中橡胶层厚度不宜过大。

表4 不同橡胶层厚度下结构基频及加速度响应

Table 4 Structural fundamental frequency and acceleration response under different rubber layer thicknesses

橡胶参数	结构基频/Hz	加速度幅值/(m·s ⁻²)	衰减指数
混凝土基础	3.61	4.57	0
10 cm	1.78	2.68	-41.4%
20 cm	1.40	2.75	-39.8%
40 cm	1.02	2.14	-53.2%

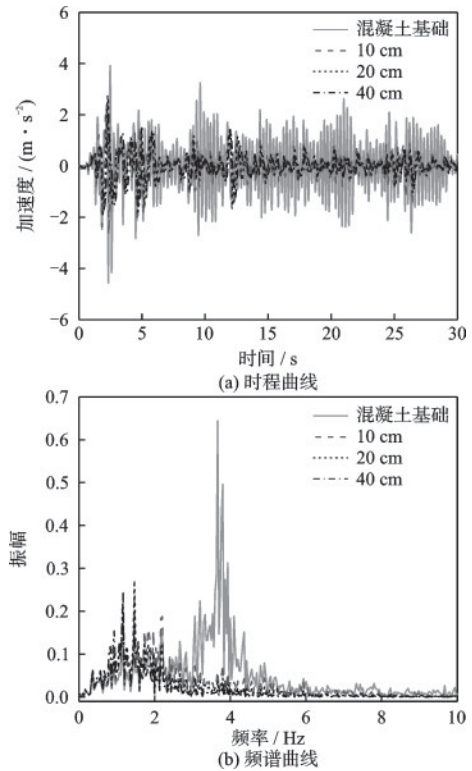


图10 不同橡胶层厚度下P点加速度时程及频谱图
Fig.10 Time history and spectrum of P-point acceleration under different rubber layer thicknesses

4.1.2 结构及橡胶层的相对变形分析

定义框架的层间位移角 θ 为楼层层间最大水平位移 Δu 与层高 h 之比,即 $\theta = \Delta u/h$,不同厚度的橡胶层周期性基础框架层间位移角如图11所示,橡胶层相对变形如表5所示。从图11及表5可见:

(1)层间位移是衡量框架就结构抗震性能的重要指标。整体来看,混凝土基础结构在第二层的层间位移最大,顶层最小。但橡胶层加入后,由于橡胶层自身的相对变形,导致结构底层相对变形增加,上部楼层则几乎线性减小,这对底层的抗震是十分不利的;

(2)橡胶层厚度比较厚(40 cm)时,衰减指数达到了-53.2%,但此时橡胶层横向相对位移和竖向压缩量都较大,分别达到了13.59 mm和21.15 mm,橡胶层自身的安全值得关注的同时,结构的舒适性也将受到影响。因此,设计周期性结构时需综合考虑橡胶层的性能;

(3)从层间位移角大小来看,带有橡胶层的基础放大了层架位移角,因此不建议在实际工程中采用单层橡胶,且单层厚度不宜过大,而是要参照震支座那样采用多层薄橡胶。

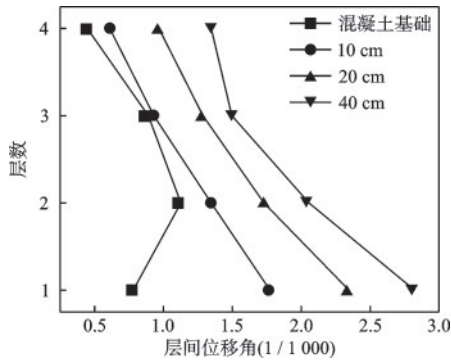


图 11 不同橡胶层厚度下框架层间位移角

Fig.11 Inter-story displacement angle of frame under different rubber layer thicknesses

表 5 不同橡胶层厚度下橡胶层相对变形

Table 5 Relative deformation of rubber layers under different rubber layer thicknesses

橡胶层相对变形	10 cm	20 cm	40 cm
横向位移/mm	6.21	9.82	13.59
竖向位移/mm	7.55	10.48	21.15

4.2 橡胶层弹性模量影响分析

本节以单层橡胶层的周期性基础为例,对比橡胶层厚度为 10 cm 条件下,弹性模量为 0.5 MPa(基准工况), 2 MPa 和 4 MPa 下框架结构的地震响应,分析橡胶弹性模量对周期性基础隔震性能的影响。

4.2.1 结构加速度响应分析

不同橡胶弹性模量下结构基频、顶部加速度幅值和衰减指数见表 6,框架 P 点加速度时程曲线及频谱图如图 12 所示。

从表 6 和图 12 可以看出随着橡胶弹性模量的增加周期性基础的隔震性能逐渐减弱,框架顶部的加速度响应整体逐渐接近混凝土基础的工况,这与一般常识是一致的。

4.2.2 结构及橡胶层相对变形分析

不同橡胶弹性模量下层周期性基础框架层间位移角如图 13 所示,橡胶层相对变形见表 7。

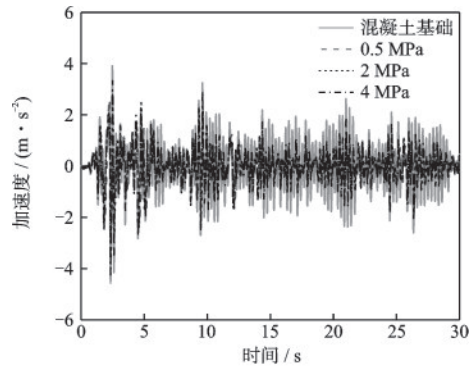
从表 7 和图 13 可见框架的层间位移和橡胶相

表 6 不同橡胶弹性模量下结构基频及加速度响应

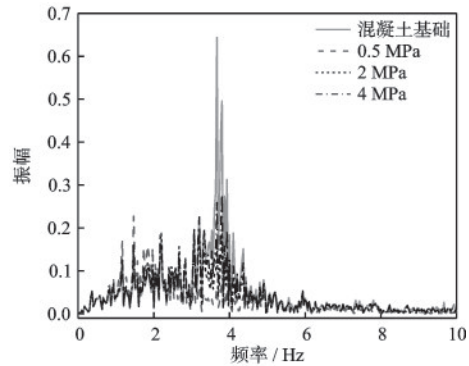
Table 6 Structural fundamental frequency and acceleration response under different rubber elastic moduli

橡胶参数	结构基频/Hz	加速度幅值/($m \cdot s^{-2}$)	衰减指数
混凝土基础	3.61	4.57	0
0.5 MPa	1.78	2.68	-41.4%
2 MPa	2.84	4.04	-11.6%
4 MPa	3.20	4.25	-7.0%

对变形随着橡胶弹性模量的增加而减小,其中弹性模量为 2 MPa 和 4 MPa 时,结构的 2 层和 3 层的变形显著低于混凝土基础的工况。



(a) 时程曲线



(b) 频谱图

图 12 不同橡胶弹性模量下 P 点加速度时程及频谱图

Fig.12 Time history and spectrum of P-point acceleration under different rubber elastic moduli

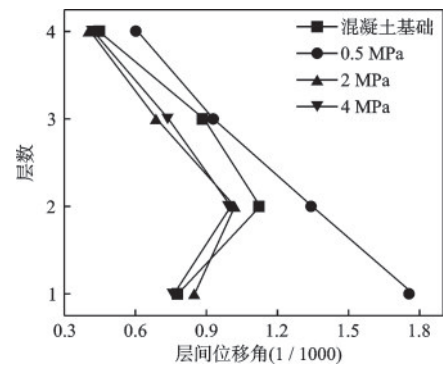


图 13 不同橡胶弹性模量下框架层间位移角

Fig.13 Inter-story displacement angle of frame under different rubber elastic moduli

表 7 不同橡胶弹性模量下橡胶层相对变形

Table 7 Relative deformation of rubber layers under different elastic moduli of rubber

橡胶层相对变形	0.5 MPa	2 MPa	4 MPa
横向位移/mm	6.21	1.40	0.68
竖向位移/mm	7.55	1.44	0.72

因此,从橡胶层弹性模量的角度来看,应尽可能的选用较低的弹性模量,但还需综合考虑橡胶层自身的变形。

4.3 橡胶层层数影响分析

本节以橡胶层厚度为 10 cm,弹性模量为 0.5 MPa 的周期性基础为例,对比分析橡胶层层数为 1 层(基准工况)、2 层和 3 层时框架的地震响应,分析橡胶层数对周期性基础隔震性能的影响。

4.3.1 结构加速度响应分析

不同橡胶层层数下结构基频、顶部加速度幅值和衰减指数见表 8,框架 P 点加速度时程曲线及频谱图如图 14 所示。由表 8 和图 14 可见:

表 8 不同橡胶层层数下结构基频及加速度响应

Table 8 Structural fundamental frequency and acceleration response under different numbers of rubber layers

橡胶参数	基频/Hz	幅值/($m \cdot s^{-2}$)	衰减指数
混凝土基础	3.61	4.57	0
1层	1.78	2.68	-41.4%
2层	1.43	2.87	-37.2%
3层	1.21	2.75	-39.8%

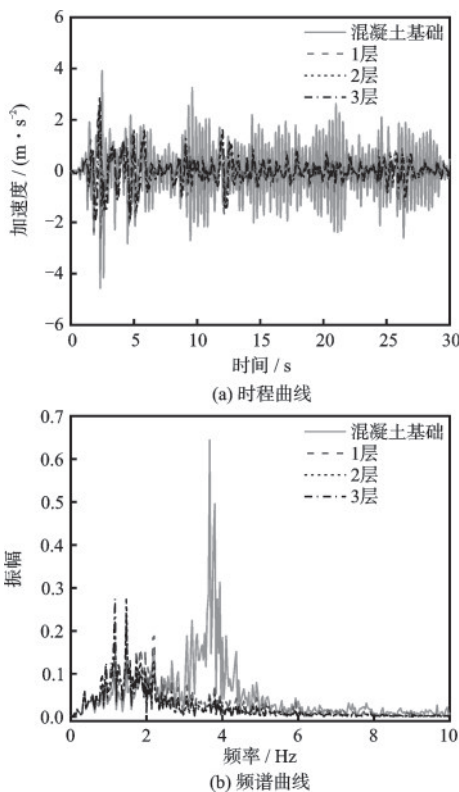


图 14 不同橡胶层层数下 P 点加速度时程及频谱

Fig.14 Time history and spectrum of P-point acceleration under different numbers of rubber layers

(1)随着橡胶层数的增加结构加速度峰值先增大后减小,如果橡胶层数继续增加结构的加速度响应可能会继续下降;

(2)橡胶层数的增加并没有增加提高周期性基础的隔震性能,因此,从实际操作便利性角度来看尽可能选用单层橡胶层的周期性基础。

4.3.2 结构及橡胶层相对变形分析

不同橡胶层层数下周期性基础框架层间位移角如图 15 所示,橡胶层相对变形见表 9。由图 15 和表 9 可以得到:

相比较于较厚(40 cm)的橡胶层,分层后各层橡胶(10 cm)的横向相对变形和压缩量均得到了较好的控制,但同时结构变形相较基础工况也在进一步的增加。

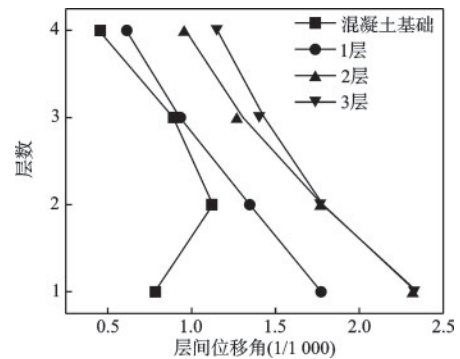


图 15 不同橡胶层层数下框架层间位移角

Fig.15 Inter-story displacement angle of frame under different numbers of rubber layers

表 9 不同橡胶层层数下橡胶层相对变形

Table 9 Relative deformation of rubber layers under different numbers of layers

橡胶参数	横向位移/mm	竖向位移/mm
1层	第1层/6.21	第1层/7.55
	第1层/4.47	第1层/5.48
2层	第2层/5.71	第2层/7.30
	第1层/3.50	第1层/4.35
3层	第2层/4.04	第2层/5.15
	第3层/4.60	第3层/6.93

4.4 地震波类型影响分析

本节以基准工况的周期性基础为例,对比分析周期性基础在 0.2gEL 波(基准工况)、0.2gWL 波和 0.2gNR 波的作用下的隔震性能。

4.4.1 结构加速度响应分析

不同类型的地震波下结构基频、加速度幅值和

衰减指数见表 10, 框架 P 点加速度时程曲线及频谱图如图 16 所示。

从表 10 和图 16 可见周期性基础对不同类型的地震波都有良好的隔震效果, 尤其对 WL 波的隔震效果最好, 因为混凝土基础结构基频与 WL 波主频接近, 引发共振作用和较大的动力响应, 从而与周

表 10 不同类型的地震波下结构基频及加速度响应
Table 10 Fundamental frequency and acceleration response of structures under different types of seismic waves

基础类型	地震波类型			
	EL	WL	NR	
混凝土基础	基频/Hz	3.61		
	幅值/($m \cdot s^{-2}$)	4.57	5.19	4.04
周期性基础	基频/Hz	1.78		
	幅值/($m \cdot s^{-2}$)	2.68	2.58	2.80
	衰减指数	-41.4%	-50.3%	-30.7%

期性基础结构的顶部加速度产生较大的差别。

4.4.2 结构及橡胶层相对变形分析

不同地震波类型下周期性基础橡胶层相对变形见表 11, 框架层间位移角如图 17 所示。由图 17 和表 11 可以得到:

(1) 在不同类型地震波作用下周期性基础结构的层间位移都在第一层达到最大值, 且都呈现出从上到下依次递增的规律;

(2) 相较于 EL 波和 NR 波这类低频波, 独立性基础对 WL 波等高频波的隔震效果较为显著。

表 11 不同类型的地震波下橡胶层相对变形
Table 11 Relative deformation of rubber layers under different types of seismic waves

橡胶层相对变形	EL	WL	NR
横向位移/mm	6.21	3.28	6.04
竖向位移/mm	7.55	5.05	5.71

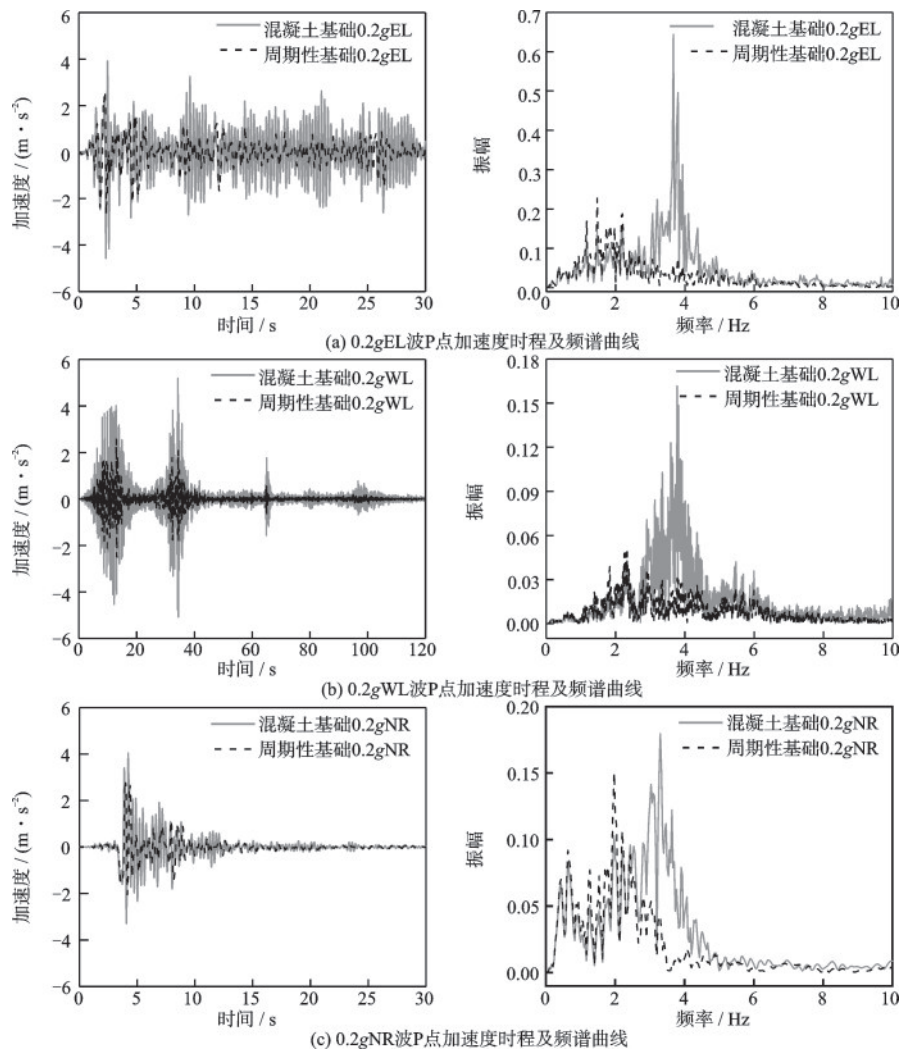


图 16 不同类型地震波作用下结构顶层 P 点加速度响应

Fig.16 Acceleration response of point P at the top story under different types of seismic waves

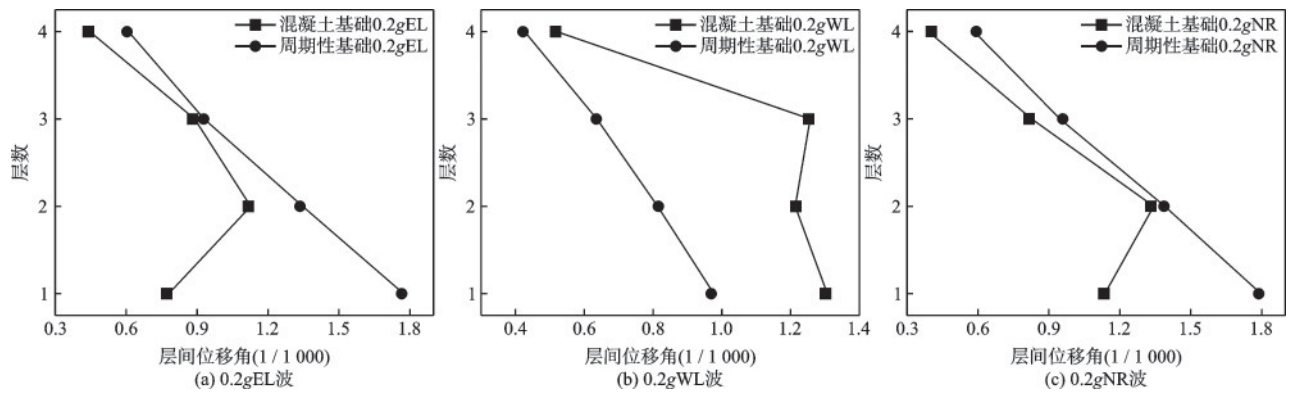


图 17 不同类型地震波下框架层间位移角

Fig.17 Inter-story displacement angle of frame under different types of seismic waves

4.5 地震波幅值的影响分析

本节以基准工况的周期性基础为例,对比分析周期性基础在 0.1gEL 波、0.2gEL 波和 0.4gEL 波的作用下的隔震性能。

4.5.1 结构加速度响应分析

不同幅值的地震波下结构基频、顶部加速度幅值和衰减指数见表 12,框架 P 点加速度时程曲线及频谱图如图 18 所示。

随着地震波幅值的增加,衰减指数逐渐减小。但在地震波幅值为 0.4g 时,衰减指数仍有一 24.6%,说明即使在高烈度地震下周期性基础仍能对建筑物起到一定的保护作用。

表 12 不同幅值的地震波下结构基频及加速度响应

Table 12 Structural fundamental frequency and acceleration response under different amplitudes of seismic waves

基础类型	地震波幅值		
	0.1gEL	0.2gEL	0.4gEL
混凝土基础	基频/Hz		
	3.61		
周期性基础	基频/Hz		
	1.78		
混凝土基础	幅值/($m \cdot s^{-2}$)		
	3.07	4.57	6.98
周期性基础	幅值/($m \cdot s^{-2}$)		
	1.48	2.68	5.26
混凝土基础	衰减指数		
	-51.8%	-41.4%	-24.6%

4.5.2 结构及橡胶层相对变形分析

不同幅值的地震波下周期性基础框架层间位

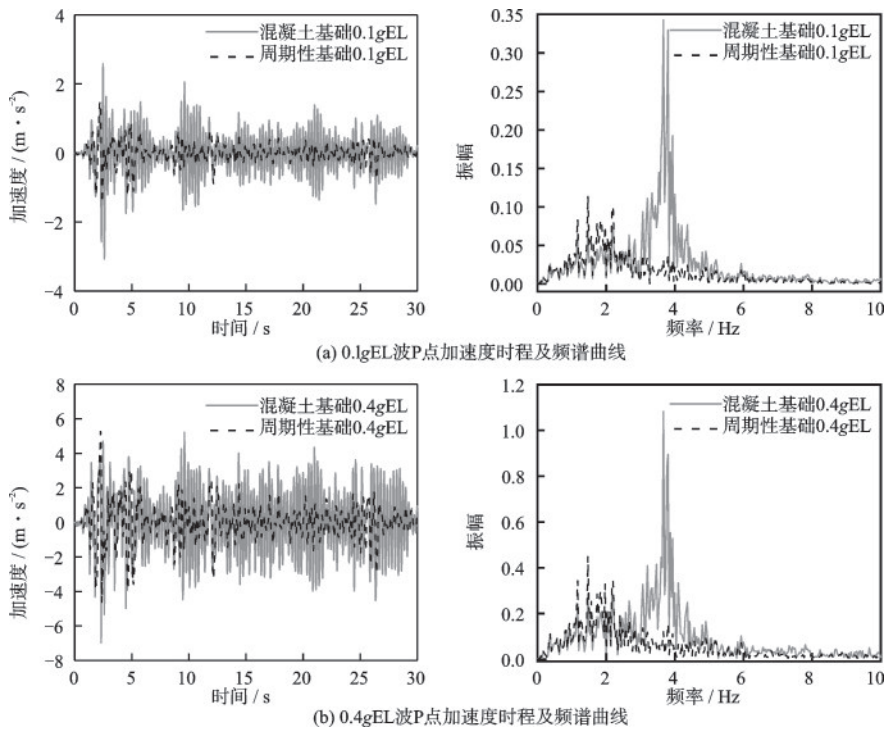


图 18 不同地震幅值时结构顶层 P 点加速度响应

Fig.18 Acceleration response of point P at the top story under different seismic wave amplitudes

移角如图 19 所示,橡胶层相对变形见表 13。

框架层间位移和橡胶层相对变形随地震波幅值的提高而增加,同时周期性基础的隔震性能在持续下降,这可能是因为在高烈度地震波下橡胶层变形过大,超过了橡胶层的极限应变从而使周期性基础隔震性能下降。

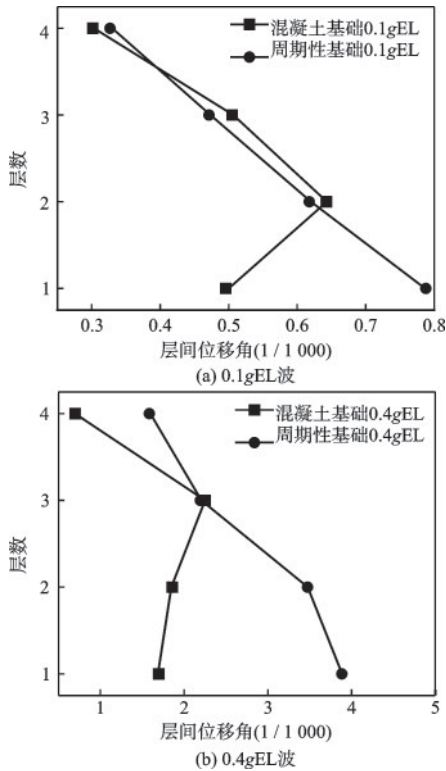


图 19 不同幅值的 EL 波下框架层间位移角

Fig.19 Inter-story displacement angle of frame under different amplitudes of EL waves

表 13 不同幅值的地震波下橡胶层相对变形

Table 13 Relative deformation of rubber layers under different amplitudes of seismic waves

橡胶层相对变形	0.1gEL	0.2gEL	0.4gEL
横向位移/mm	3.31	6.21	11.47
竖向位移/mm	4.82	7.55	10.88

5 结 论

通过建立框架-周期性基础有限元模型,研究了橡胶层厚度、层数、弹性模量对层状周期性基础隔震性能的影响,采用加速度衰减指数分析了不同类型与幅值的地震波作用下的周期性基础上部框架加速度响应的变化规律,基于本文结构模型及其工况计算分析,可得到如下主要结论:

(1) 周期性基础的隔震性能随橡胶弹性模量的增加而降低,橡胶层厚度与层数的增加,导致结构基频降低,与地震动的卓越频率接近,从而易于发生共振作用使结构产生较大的动力响应。

(2) 受橡胶层横向相对变形的影响,结构底层的相对变形最大,但相比较于较厚(40 cm)的橡胶层,分层后各层橡胶(10 cm)的横向相对变形和压缩量均得到了较好的控制,因此建议采用分层橡胶的排列方式。

(3) 周期性结构的隔震性能不是单一因素所能决定的,而是受多方面的影响。如:结构的加速度响应随着橡胶弹性模量的提高而增加,但同时结构基频逐渐远离地震波主频,共振作用逐渐减弱,这导致结构的层间位移逐渐减小。因此,尚需结合关键影响因素做进一步的深入探讨。

参考文献:

- [1] Sigalas M M, Economou E N. Elastic and acoustic wave band structure[J]. Journal of Sound and Vibration, 1992, 158(2): 377-382.
- [2] 温熙森. 光子/声子晶体理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 王航, 王文强. 一维黏弹性声子晶体的色散与耗散关系[J]. 高压物理学报, 2020, 34(6): 17-27.
Wang H, Wang W Q. Relationship between dispersion and dissipation of one-dimensional viscous elastic phononic crystals[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(6): 17-27. (in Chinese)
- [4] Smirnov G V, Chumakov A I. Peculiar features of nuclear resonant Bragg scattering[J]. Physical Review A, 2019, 100(4): 043830.
- [5] 汤璐嘉, 吕延军, 刘成, 等. 局域共振型声子晶体梁的动态模型和带隙[J]. 振动. 测试与诊断, 2021, 41(6): 1132-1137, 1238.
Tang L J, Lv Y J, Liu C, et al. Dynamic model and band gap of local resonant phononic crystal beam[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(6): 1132-1137, 1238. (in Chinese)
- [6] 张印, 尹剑飞, 温激鸿, 等. 基于质量放大局域共振型声子晶体的低频减振设计[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 26-23.
Zhang Y, Yin J F, Wen J H, et al. Low frequency vibration reduction design for inertial local resonance phononic crystals based on inertial amplification[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(17): 26-23. (in Chinese)

- [7] 郁殿龙. 基于声子晶体理论的梁板类周期结构振动带隙特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
Yu D L. Vibration band gap characteristics of beam plate quasi periodic structures based on the theory of phononic crystals [D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [8] 温激鸿. 声子晶体振动带隙及减振特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
Wen J H. Study on vibration band gap and vibration isolation properties of phononic crystals [D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [9] 陈晓斌, 王业顺, 唐孟雄, 等. 周期性四组元局域共振桩带隙特征及隔振性能研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 110-118.
Chen X B, Wang Y S, Tang M X, et al. Study on band gap characteristics and vibration isolation of local resonance pile with periodic four component [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 110-118. (in Chinese)
- [10] Achaoui Y, Antonakakis T, Brûlé S, et al. Clamped seismic metamaterials: ultra-low frequency stop bands [J]. New Journal of Physics, 2017, 19(6): 063022.
- [11] Brûlé S, Javelaud E H, Enoch S, et al. Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves [J]. Physical Review Letters, 2014, 112(13): 133901.
- [12] Shi Z F, Cheng Z B, Xiang H J. Seismic isolation foundations with effective attenuation zones [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 57: 143-151.
- [13] Shi Z F, Huang J K. Feasibility of reducing three-dimensional wave energy by introducing periodic foundation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 50: 204-212.
- [14] Liu X, Shi Z, Mo Y L, et al. Effect of initial stress on attenuation zones of layered periodic foundations [J]. Engineering Structures, 2016, 121(15): 75-84.
- [15] Bao J, Shi Z, Xiang H, Dynamic responses of a structure with periodic foundations [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(7): 761-769.
- [16] Liu X, Ren Y, Song X. Combined attenuation zones of combined layered periodic foundations [J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 7114.
- [17] Zhao C F, Zeng C, Huang H, et al. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation [J]. Engineering Structures, 2021, 226(7): 111364.
- [18] 郭辉. 隔震层位置及阻尼比对隔震效果的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
Guo H. Effects of the location of the isolation layer and the damping ratio on the isolation effect [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [19] 王国波, 王垚, 孙富学, 等. 基础类型对框架结构及场地土地震响应影响试验研究 [J]. 世界地震工程, 2022, 38(2): 96-109.
Wang G B, Wan Y, Sun F X, et al. Experimental study on influence of foundation type on seismic response of frame structure and site soil [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(2): 96-109. (in Chinese)
- [20] 鲁正, 王贤林, 何任飞, 等. 一种组合型质量阻尼器的振动台试验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 220-225.
Lu Z, Wang X L, He R F, et al. An experimental study on shaking table test of a combined mass damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 220-225. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)