

框架剪力墙结构的滤波减振特性

张孝荣^{1,2},冯斓梦²,程志宝²

(1. 中国人民大学校园建设管理处,北京 100872; 2. 北京交通大学土木与建筑工程学院,北京 100044)

摘要 目的 将固体物理学中周期结构理论拓展应用到土木工程中,计算框剪结构的频散动力特性,进一步研究框剪结构的滤波减振特性. 方法 首先应用 COMSOL MULTIPHYSICS 建立了框剪结构标准层楼结构模型并施加周期性边界条件,求解计算框剪结构频散关系;其次参数分析讨论了框剪结构典型参数对第一衰减域的影响;最后应用 ANSYS 对框剪结构模型进行模态分析、频率响应分析和时程分析,验证其滤波特性. 结果 框剪结构频散曲线具有带特性. 当外部激励处于滤波衰减域范围内时,振动随着传播不断衰减,结构响应较小;相反当外部激励处于滤波衰减域范围之外时,振动随着传播没有衰减,结构响应较大. 结论 应用周期结构理论,可有效分析框剪结构的滤波减振特性,利用该特性有望在设计阶段对框剪结构进行优化布置,从而减小框剪结构内部设施在外部激励下的动力响应.

关键词 周期结构;框剪结构;频散特性;衰减域;减振

中图分类号 TU375.4;O342 文献标志码 A

Vibration Attenuation in Frame-Shear Wall Structures based on the Filtering Effect

ZHANG Xiaorong^{1,2}, FENG Lanmeng², CHENG Zhibao²

(1. Construction and management Division, Renmin University of China, Beijing, China, 100872; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 100044)

Abstract: Introducing the periodic structure theory into civil engineering, the dispersion property of the frame-shear wall structure is investigated theoretically in this paper. First, three dimensional standard floor model of a frame-shear wall structure is built using the finite element software COMSOL MULTIPHYSICS. Applying the Bloch-Floquet boundary conditions, dispersion curves of the infinite periodic frame-shear wall structure are calculated. Parametric analysis is conducted to investigate the influences of the geometrical and physical parameters on the first attenuation zone of the frame-shear wall structure. Further, dynamic properties of finite periodic frame-shear wall structures are simulated by using the finite element software ANSYS. Modal analysis, harmonic analysis and time history analysis of the considered frame-shear wall structures are conducted. It is

收稿日期:2017-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51508023,51678046);北京市自然科学基金项目(8182045);教育部中央高校基本科研项目(2016JBM035)

作者简介:张孝荣(1971—),男,高级工程师,主要从事工程结构分析方面研究.

found that frame-shear wall structures have a special filtering effect. In the attenuation zones, waves/vibrations will be forbidden and dynamic responses of the upper structure is very small, while out of the attenuation zones, waves/vibrations cannot be propagated and dynamic responses of the upper structure are very large. Based on this special property, frame-shear wall structures could be optimized to attenuate external harmful vibrations.

Key words: periodic structure; frame-shear wall structure; dispersion property; attenuation zone; vibration attenuation

凝固态物理学中相关研究表明,周期结构对弹性波具有选择性透过作用,即衰减域滤波特性.处于某些频段(衰减域)的波/振动不能传过周期结构,而处于其他频段(通频带)的波/振动可传过周期结构.这种频散动力特性在结构隔震减振,降噪,隔热等方面具有众多潜在应用价值,因而引起了国内外众多学者的关注^[1-7].简单来讲,周期结构是由某种结构单元按照周期性的方式排列而形成的结构形式^[8-9].周期性布置形式可简化设计计算、方便施工,因而这种结构形式在土木工程领域得到广泛应用,如网架结构、多高层建筑结构、铁路轨道结构、边坡支护结构等.2007年以来,北京交通大学石志飞教授课题组将周期结构理论引入土木工程,经过理论、数值及试验研究系统研究了周期基础隔震应用及周期波屏障减振应用问题,取得了一系列创新性的研究成果^[9-10].程志宝等^[7-11]研究了由混凝土和橡胶构成的不同形式的周期基础,并通过理论及试验研究验证了其地对地震动的阻隔效果.此外,J. Thompson^[12]基于周期结构理论研究了钢轨结构的频散动力特性并通过试验验证了其理论的正确性.P. Wang等^[13]研究了周期性轨道结构的衰减域形成机理.该研究发现周期轨道板结构的衰减域即包括散射型和局域共振型衰减域.J. Lu等^[14-15]提出了由高架桥、桥墩及地基土构成的周期结构的动力特性.

与已有研究不同,笔者将以工程中常用的框架剪力墙结构为研究对象,借鉴固体物理学中的周期结构理论来讨论框剪结构的频散动力特性,进一步分析框剪结构的滤波减

振特性.几何上看,框剪结构可以看做是其标准层结构研究高度方向不断堆积而成的一种周期结构.可以想象周期性布置形式也赋予了框剪结构一些独特的动力特性^[9-10].但目前应用周期结构理论研究工程结构频散特性的研究较少.基于此,笔者先利用 COMSOL MULTIPHYSICS 建立三维框剪结构频散基本单元模型,引入周期性边界条件计算了框剪结构的频散曲线;其次参数分析讨论了框剪结构典型参数对第一衰减域的影响;第三应用 ANSYS 对框剪结构进行了模态分析、频域响应分析及时程分析,验证框剪结构的滤波减振特性.研究表明,应用周期结构理论可有效分析框剪结构的滤波减振特性,利用该特性有望在设计阶段对框剪结构进行优化布置,从而减小框剪结构内部设施在外部激励下的动力响应.

1 基本理论

1.1 模型及简化

考虑某钢筋混凝土框剪结构,总建筑平面长×宽为 50 m×15.5 m,结构在 x 轴方向有 8 片剪力墙.表 1 给出了该结构的详细参数^[16].如上所述,框剪结构可看作是标准层结构沿高度方向简单堆积而成的一种一维周期结构.取标准层单元作为研究对象,来计算其频散曲线.鉴于标准层结构模型较为复杂,将采用 COMSOL MULTIPHYSICS 来建立计算模型,并假定结构处于弹性状态.如图 1 所示,计算中结构梁、板、柱构件均采用三维固体单元,标注层(周期单元)层高 $h = 3.6$ m.考虑结构层、抹灰层自重以及楼板活载的组

合效应,活载组合系数取 0.5,恒载组合系数取 1. 将外墙和内墙的荷载集中到梁结构上,对模型中各构件密度的修正参数见表 2. 计算中在所有上下柱端施加周期性边界条件,设定波矢一维 Brillouin 区($-\pi/h,\pi/h$)进

行扫描,并求解系统特征值从而得到波矢与频率的关系曲线,即为频散曲线^[10,17]. 频散曲线数理特性即频散特性. 从频散曲线中可得框剪结构的通频域和衰减域.

表 1 结构参数

Table 1 Structure parameters					
标准层层高/m	柱截面长×宽/mm	楼板板厚/mm	剪力墙厚度/mm		梁截面长×宽/mm
3.6	600×600	120	300		300×700
楼面恒载/(kN·m ⁻²)	混凝土型号	钢筋等级	荷载/(kN·m ⁻¹)		楼面荷载/(kN·m ⁻²)
			内墙线	外墙线	
4.33	C30	HRB400	9	19	2.0

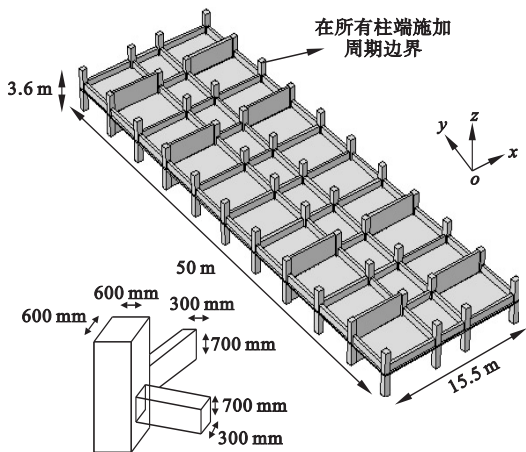


图 1 标准楼层单元示意图

Fig. 1 Schematic of the standard floor

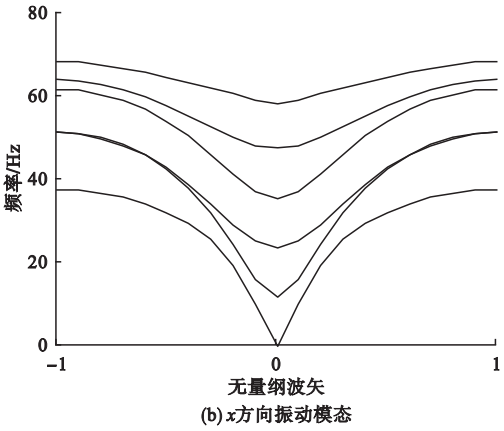
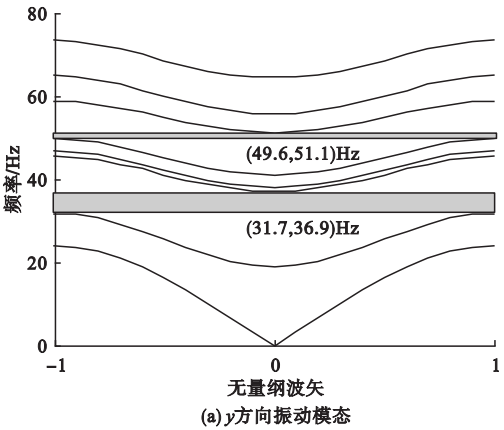
表 2 修正后的构件密度

Table 2 Modified density					kg/m ³
柱	剪力墙	楼板	外围梁	楼板梁	
2 500	2 500	4 440	13 420	7 672	

1.2 频散关系

三维结构振动模式包括沿 x 、 y 、 z 方向的振动模式及不同方向振动耦合模式. 由于高层结构底端固定,框架柱在水平方向的变形为弯剪变形,故本研究将不考虑框架柱和剪力墙在竖向上的位移和不均匀错动. 对振动模式进行分类讨论分析,当仅考虑 y 方向的振动时,频散关系曲线见图 2(a);图中横坐标为波矢即波动的空间特性,图中纵坐标为频率即波动的时

空属性^[2];仅考虑 x 方向的振动时,频散关系曲线见图 2(b);考虑 y 、 z 方向振动耦合时,频散关系曲线见图 2(c). x 、 z 方向振动耦合情况,在此不再赘述;关于 z 方向上振动衰减域,由于其频率范围过高,工程应用价值较小,不予考虑.



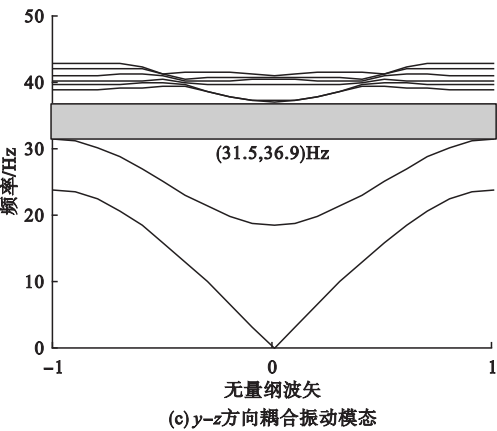


图2 频散曲线

Fig. 2 Dispersion curves for vibration

从图2(a)中可知,结构y方向振动模式对应的频散曲线中31.7~36.9 Hz内存在一个衰减域.频散曲线上出现衰减域(该频率范围没有相应的波矢),说明在该频率范围内没有相应的波动模式.从图2(b)中可知,结构x方向振动模式相对应的频散曲线中没有出现衰减域.此时构件变形主要为柱的弯曲变形、楼板位移以及楼板间相对变形.从图2(c)可以看出,考虑y方向振动模式和z方向振动模式耦合时,31.5~36.9 Hz内存在一个衰减域.

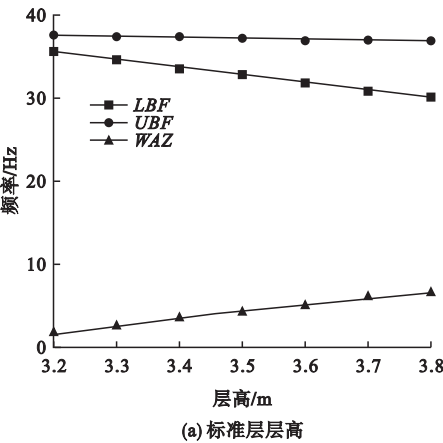
2 参数分析

以y方向上衰减域为例,探究了框剪结构中典型参数(层高、板厚、混凝土强度等级、柱截面、剪力墙数量等)对第一衰减域起止频率(Lower Bound Frequency, LBF)、第一衰减域截止频率(Upper Bound Frequency, UBF)和第一衰减域宽度(Width of Attenuation Zone, WAZ)的影响.需要说明的是,所有选取的参数均满足建筑设计规范.

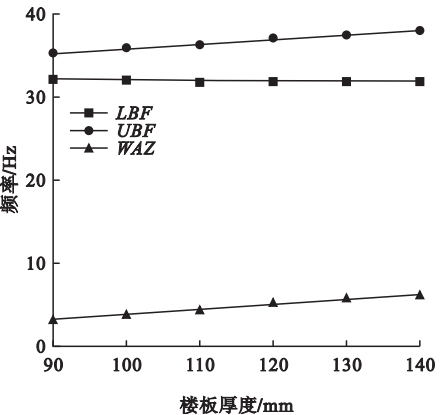
2.1 标准层层高、楼板厚及柱截面

首先,层高变化时框架柱以及剪力墙的水平刚度会逐渐减小,进而会对频散曲线产生影响.图3(a)给出了标准层层高对衰减域的影响.从图中可见,在楼层高度从3.2 m增

加到3.8 m的过程中,LBF逐步减小而UBF基本保持不变,因此WAZ逐渐增大.其次,楼板厚度会使楼板平面内的刚度,从而影响楼板的相对变形.图3(b)给出楼板厚度对衰减域的影响.从图中可见,随着楼板厚度从90 mm变化到140 mm,LBF基本保持不变而UBF则逐渐增加,故WAZ逐渐变宽.再次,随着方向截面框架柱边长增加,结构水平刚度也逐渐增大,会影响衰减域.图3(c)给出柱截面边长对衰减域的影响.从图中可见,LBF随着柱边长增大而增大,同时UBF基本保持不变,因此WAZ逐渐减小.尤其当框架柱边长在500 mm时,WAZ缩减为0;随着柱边长进一步增大,原来的第二衰减域变为第一衰减域,从而导致图中LBF、UBF和WAZ产生跳跃.



(a) 标准层层高



(b) 楼板厚度

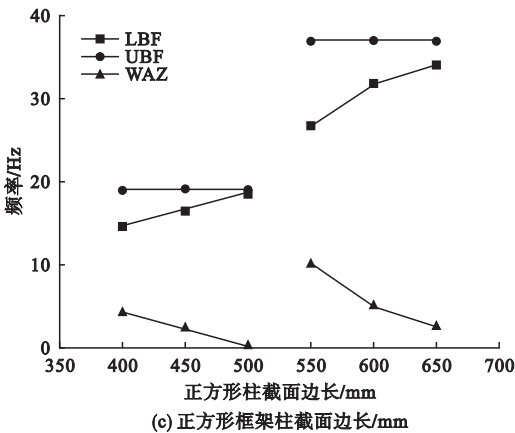


图3 典型结构参数对衰减域的影响

Fig. 3 Influences of typical structure parameters on the attenuation zone

2.2 混凝土强度等级及配筋率

不同等级混凝土的混凝土其弹性模量会发生改变进而影响衰减域. 图4 给出混凝土强度等级对衰减域的影响曲线.

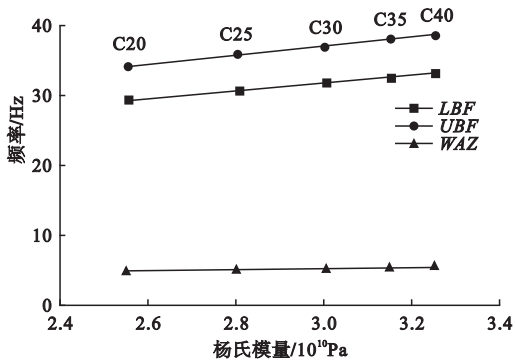


图4 混凝土杨氏模量对衰减域的影响

Fig. 4 Influence of the Young's modulus of concrete on attenuation zone

随着混凝土杨氏模量不断增大, *LBF* 和 *UBF* 均增大但 *WAZ* 基本不变. 在实际工程中, 为增加结构的延性, 通常会在混凝土中配置一些钢筋, 下面研究配筋对衰减域的影响. 考虑 *y* 方向的衰减域, 楼板梁为竖向受力构件, 故楼板梁配筋对楼板平面内刚度的影响可忽略, 除此之外框架柱、剪力墙、楼板配筋率见表3. 计算中将混凝土和钢筋视为基体材料和纤维材料, 基于复合材料理论计算钢筋混凝土材料的等效材料参数(密度、杨氏模量)^[18]. 表4 给出考虑钢筋前后的衰减域

计算结果. 可以看出, 第一衰减域的 *LBF*、*UBF* 和 *WAZ* 变化很小. 进一步研究发现, 在规范规定的配筋率范围内, 配筋对衰减域的影响可忽略不计. 因此方便起见, 实际计算中配筋影响可忽略.

表3 配筋率

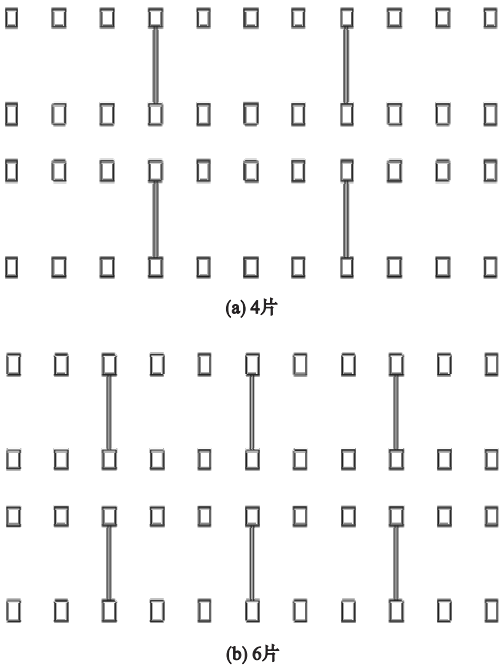
Table 3 Reinforcement ratio %			
框架柱	剪力墙	楼板 <i>x</i> 方向	楼板 <i>y</i> 方向
0.685	0.326	0.452	0.406

表4 配筋前后衰减域对比

Table 4 Comparison of attenuation zone Hz			
配筋情况	<i>LBF</i>	<i>UBF</i>	<i>WAZ</i>
配筋前	31.7	36.9	5.2
配筋后	32.3	37.2	4.9

2.3 剪力墙数量及布置

考虑图5 所示的5 种剪力墙布置形式. 考虑结构弱侧剪力墙数量从4 片逐步增加到12 片, 图6 给出剪力墙数目对衰减域的影响. 从图中可以看到, 随着剪力墙数目的提高, *LBF*、*UBF* 以及 *WAZ* 变化较小. 这是由于结构弱侧布置剪力墙主要增强结构 *x* 方向的水平刚度, 对 *y* 方向水平刚度贡献较小, 因而对于 *y* 方向上衰减域影响较小.



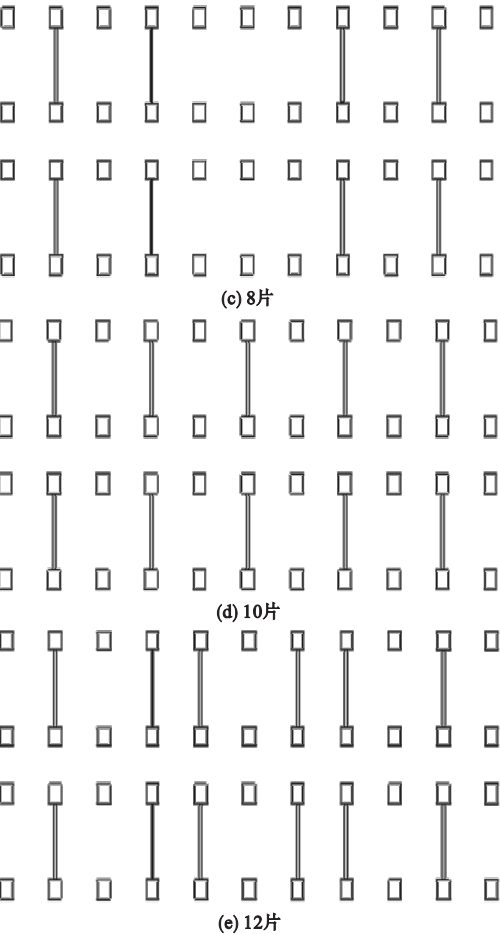


图5 不同数目剪力墙平面布置图

Fig. 5 Frame-shear wall structure with different shear walls

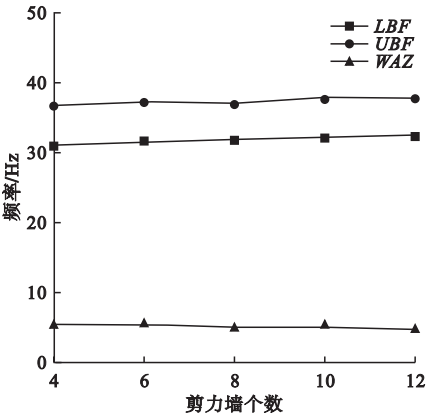


图6 剪力墙对衰减域的影响

Fig. 6 Influence of the shear walls on the attenuation zone

3 数值模拟

以上研究了无限周期结构的频散特性.

实际应用中框剪结构均为有限周期结构,笔者将应用 ANSYS 研究有限周期框剪结构的动力特性.

3.1 模态分布特性

采用上述标准层结构,图7建立了一个框剪结构.该结构底部为固定端,同时约束楼板振动及 x 方向位移.由上述分析可知,该框剪结构标准层构成的无限周期结构的衰减域范围在 31.7 ~ 36.9 Hz.考虑 50 Hz 以内特征频率,图7(b)给出有限周期结构层数与框剪结构特征频率的关系.从图中可以看出,随着有限周期框剪结构层数从3层变化到9层的过程中,50 Hz 以内的特征频率越来越多.需要说明的是,虽然随着层数的增多,结构特征频率分布不断逼近无限周期结构衰减域,但在无限周期结构的衰减域 31.7 ~ 36.9 Hz 范围内不存在特征值.这意味着由这种形式的基本层构成的框剪结构,无论层数如何改变,在无限周期结构的衰减域内,都不会存在共振模态.

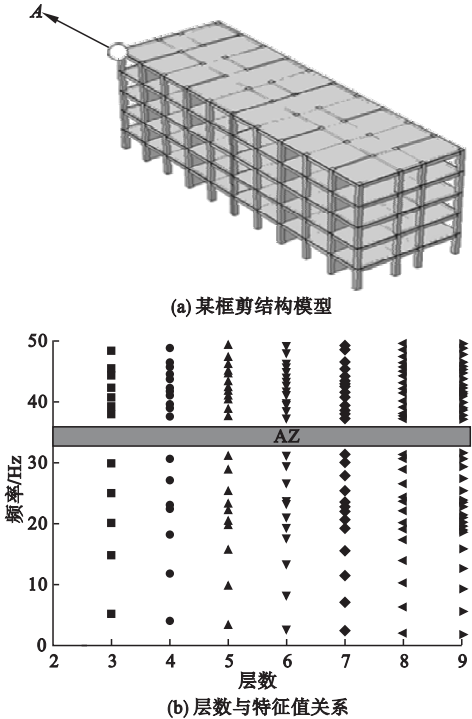


图7 框剪结构模型及其特征频率分布

Fig. 7 Periodic frame-shear wall structure and the distributions of their eigen-frequencies

3.2 谐响应

为了进一步研究有限周期结构的动力特性,进行了频域分析. 计算中,对比分析考虑了有限周期框剪结构层数为4、6和8所对应的三个结构. 在底部y方向施加简谐位移荷载,考虑频率范围0~85 Hz,步长为1 Hz,计算整个结构的稳态响应. 拾取楼层顶端A点的稳态位移响应. 并定义结构顶部位移频率响应函数(Frequency Response Function, FRF)如下^[19-20]:

$$FRF(f) = 20 \lg(u(f)/u_0).$$
 (1)

式中: $u(f)$ 为频率 f 的简谐位移荷载输入下A点的稳态位移幅值; u_0 为输入简谐位移幅值. 需要指出的是, $FRF > 0$ 意味着框剪结构的底部位移输入得到放大; $FRF < 0$ 意味着框剪结构底部位移输入得到有效抑制.

有限周期框剪结构的频率响应函数及修正的频散曲线如图8所示. 从图8(a)可见,24~37 Hz和46~73 Hz两个区域,频率响应函数值小于零,这意味着底部输入的激励得到衰减,且随着层数增加衰减特性越明显. 当层数为6、8层时,频率响应函数在50~60 Hz内略有波动,这是由于结构扭转模态的影响.

需要指出的是,该结构的第一衰减域的频率范围在31.7~36.9 Hz,而从图8(a)可以看出有限周期结构的频率响应函数中衰减域的范围远大于31.7~36.9 Hz. 对此进一步研究分析各阶频散曲线所对应的振型. 研究发现,结构第1阶振型为楼板的整体变形,其他振动模态中则有明显的楼板内部相对变形. 频域响应分析所采用的加载方式是在底部所有柱端施加同步同相简谐荷载. 可以想象,此时很难激发楼板内部相对变形模态,故产生了衰减域聋带(因某些振动模态在特定的加载方式下无法被激起而产生的衰减域),因而频域响应函数中衰减域范围得到拓宽. 去除简谐机理无法激起的频散曲线,图8(b)给出了修正后的频散关系曲线. 此时第

一衰减域频率范围拓宽为24~37 Hz,与频率响应函数吻合较好.

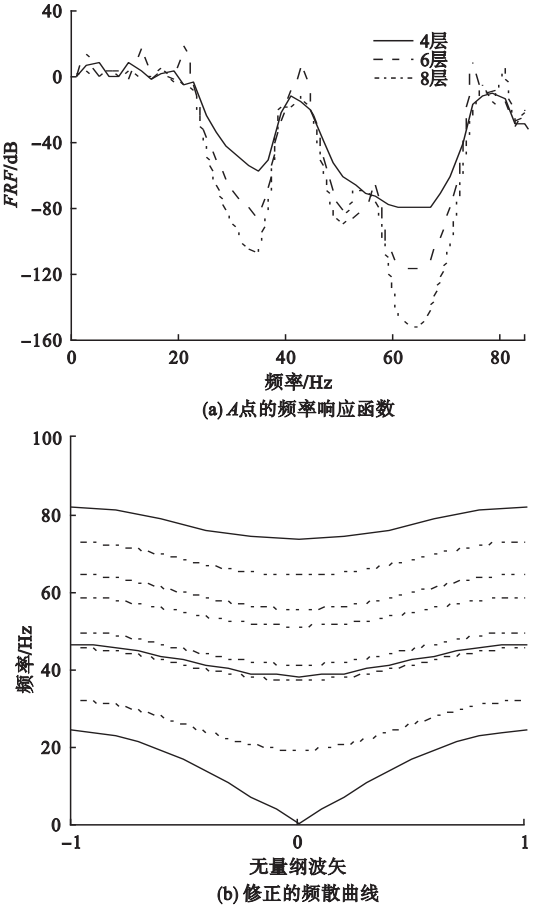


图8 有限周期框剪结构的频率响应函数及修正的频散曲线

Fig. 8 Frequency response function at point A and the modified dispersion curves

3.3 时程响应

下面将通过时程响应计算,研究结构在振动时程输入下的响应. 图9(a)给出了某振动加速度时程输入下上部结构A点的加速度响应时程. 同时图9(b)给出了该底部输入振动加速度时程及其A点加速度响应的傅里叶谱. 从图中可知,输入振动的主要落在40~70 Hz,而结构第二衰减域为46.6~73.9 Hz,正好包含了该振动的主要频段,因此A点的加速度响应明显小于原始激励. 相反处于衰减域范围之外的振动有可能得到放大. 由此可见,周期结构理论可用以分析框剪

结构的滤波减振特性. 利用这种滤波特性, 在设计阶段可对框剪结构进行优化设计, 以期有效减小外部激励下结构及其内部设施的振动响应.

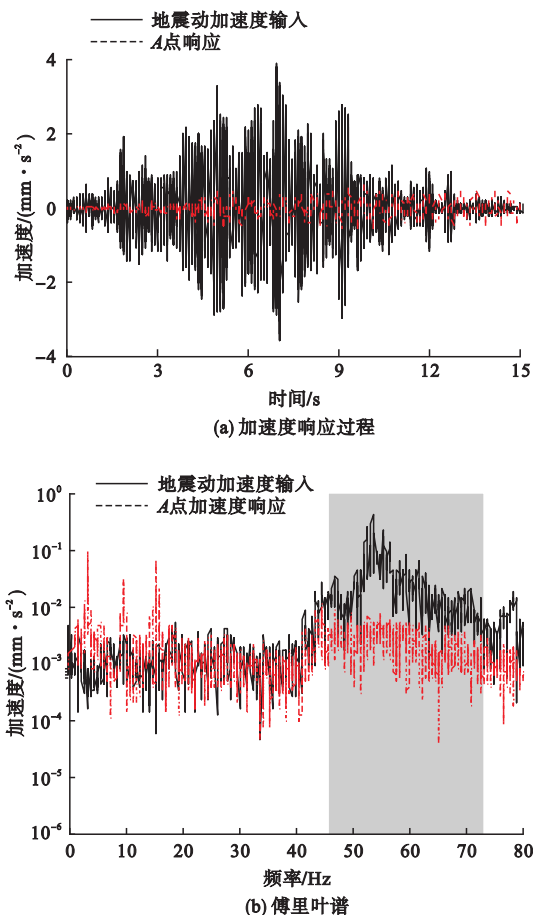


图9 地震动输入下框剪结构A点加速度响应

Fig. 9 Acceleration responses at point A under earthquake input

4 结 论

(1) 框剪结构可视为其标准层结构沿高度方向不断堆积而成的周期结构. 这种周期性布置的形式使得框剪结构的频散曲线具有带特性. 采用有限元法计算了某框剪结构频散关系曲线, 发现与 y 方向振动相对应的衰减域为 $31.7 \sim 36.9$ Hz, 而 x 方向则不存在衰减域, 当考虑 y 与 z 方向振动耦合模态时衰减域范围为 $31.5 \sim 36.9$ Hz.

(2) 参数分析发现: 层高增大会引起框架柱及剪力墙的水平刚度会逐渐减小, 因此 LBF 逐步减小而 UBF 基本保持不变, 因此 WAZ 逐渐增大. 混凝土强度等级从 C20 变化到 C40 的过程中, 混凝土杨氏模量不断增大, 因此 LBF 和 UBF 略有增大, 同时 WAZ 变化较小. 考虑配筋因素后, 框剪结构单元的杨氏模量发生改变. 但通常在规范规定的配筋率范围内, 配筋对衰减域的影响可以忽略不计. 合理优化框剪结构的几何参数和物理参数有望获得宽频衰减域.

(3) 与无限周期结构频散曲线上的衰减域相对应, 有限周期结构频率响应函数的值在衰减域范围内远小于 0, 即衰减域范围内的振动会随着传播得到有效抑制, 且随着框剪结构层数的增多, 这种抑制作用越明显, 与此同时结构的动力响应较小. 将某振动加速度时程输入结构底部, 发现传过框剪结构之后, 结构顶部的振动得到明显抑制. 周期结构理论可用于分析框剪结构的滤波减振. 利用这种特性, 有望在设计阶段对框剪结构的形式进行优化, 从而抑制衰减域范围内外部振动下结构及其内部设施的振动响应.

参考文献

- [1] 温熙森, 温激鸿, 郁殿龙, 等. 声子晶体 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
(WEN Xisen, WEN Jihong, YU Dianlong, et al. Phononic crystal [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [2] CHENG Z, SHI Z. Multi-mass-spring model and energy transmission of one-dimensional periodic structures [J]. IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control, 2014, 61(5): 739–746.
- [3] 黄建坤. 周期性排桩和波屏障在土木工程减振中的应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
(HUANG Jiankun. Application of periodic pile barriers and wave barriers to reduce vibrations in civil engineering [D]. Beijing: Beijing Jiao-

- tong University, 2014.)
- [4] KRUSHYNSKA A O, KOUZNETSOVA V G, GEERS M G D. Towards optimal design of locally resonant acoustic metamaterials[J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 2014, 71: 179 – 196.
- [5] YUAN B, WEN J, WEN X. Oblique incidence properties of locally resonant sonic materials with resonance and Bragg scattering effects [J]. Chinese physics B, 2013, 22(0743027).
- [6] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, et al. Locally resonant sonic materials [J]. Science, 2000, 289 (5485): 1734 – 1736.
- [7] 程志宝, 石志飞, 向宏军. 层状周期结构动力衰减域特性研究[J]. 振动与冲击, 2013(9): 178 – 182.
(CHENG Zhibao, SHI Zhifei, XIANG Hongjun. Vibraiton attenuaiton zones of a laminated periodic structure [J]. Journal of vibration and shock, 2013(9): 178 – 182.)
- [8] 程志宝. 周期性结构及周期性隔震基础[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
(CHENG Zhibao. Periodic structures and periodic seismic isolation foundations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.)
- [9] 石志飞, 程志宝, 向宏军. 周期结构理论及其在隔震减振中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
(SHI Zhifei, CHENG Zhibao, XIANG Hongjun. Peirodic structures: theory and applications to seismic isolation and vibration reduction [M]. Beijing: China Science Publishing, 2017.)
- [10] CHENG Z B, SHI Z F, MO Y L. Complex dispersion relations and evanescent waves in periodic beams via the extended differential quadrature method[J]. Composite structures, 2018, 187: 122 – 136.
- [11] CHENG Z B, SHI Z F, MO Y L, et al. Locally resonant periodic structures with low-frequency band gaps [J]. Journal of applied physics, 2013, 114(3): 033532 – 033532 – 9.
- [12] THOMPSON D J. Wheel-rail noise generation, part III: rail vibration[J]. Journal of sound and vibration, 1993, 161(3): 421 – 446.
- [13] WANG P, YI Q, ZHAO C, et al. Wave propagation in periodic track structures: band-gap behaviours and formation mechanisms [J]. Archive of applied mechanics, 2017, 87(3): 503 – 519.
- [14] LU J, SHA X, WU J. Resonance and cancellation phenomena caused by equidistant moving loadings in a periodic structure: a pile-supported periodic viaduct [J]. European journal of mechanics-a/solids, 2016, 59: 114 – 123.
- [15] LU J, SHEN R, SHI M. Reflection-transmission matrix method for the consolidation of a multi-layered saturated soil [J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2016, 40(11): 1594 – 1622.
- [16] 崔杰. 典型框剪结构基于 IDA 方法的地震易损性及经济性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
(CUI Jie. Analysis on seismic fragility and economic for typical frame-shear wall structure based on the IDA method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)
- [17] SHI Z, CHENG Z, XIANG H. Seismic isolation foundations with effective attenuation zones[J]. Soil dynamic and earthquake engineering, 2014, 57: 143 – 151.
- [18] CHENG Z B, SHI Z F. Novel composite periodic structures with attenuation zones [J]. Engineering structures, 2013, 56: 1271 – 1282.
- [19] HUANG J, SHI Z. Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation [J]. International journal of geomechanics, 2013, 13(2): 132 – 142.
- [20] 刘心男. 几种含初应力周期结构的动力特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
(LIU Xinnan. Dyanmic characteristics of some kinds of periodic structures with initial stress [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.)