文章编号:1673-0291(2026)04-0142-15 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20260025

带斜杆式桁架转换层的既有地铁上盖综合体结构减振与抗震性能研究

王 萌,李红霞,甘殊荣,杨维国,刘 佩
(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘 要:以公共交通为导向的发展模式(Transit-Oriented Development,TOD)推动了地铁上盖综合体建设,提高了城市空间利用率,但地铁运行荷载易向上部建筑传播,引发楼板振动放大和居住舒适度下降.早期既有上盖综合体多未设柱底隔振支座,且后期改造受结构、空间、施工及运维条件限制,可采用的减振措施较为有限.针对地铁振动引发既有建筑振动超标问题,以带斜杆式桁架转换层的地铁上盖既有综合体为研究对象,建立土体-隧道-建筑全系统三维有限元模型,并结合实测资料及既有文献结果对建模方法进行验证;在此基础上,提出增设钢弹簧浮置地板和弹性支撑2种后置减振措施,采用加速度时程响应、1/3倍频程振级及相关振动控制标准评价减振效果,同时通过动力弹塑性分析探讨减振改造对既有综合体抗震性能的影响.结果表明:原始结构上部住宅部分存在局部楼层振级超限现象,需采取针对性减振设计;钢弹簧浮置地板措施与弹性支撑措施均可有效降低结构竖向振动响应,改善上部住宅人群舒适度,且未削弱原结构在地震作用下的整体抗震性能.综合减振效果、经济性、施工可实施性及既有建筑空间条件,建议钢弹簧浮置板优先安装在既有综合体上部建筑首层,浮置板厚度宜控制在100~150 mm;弹性支撑措施的体系目标自振频率宜取3~5 Hz.研究成果可为带桁架转换层既有地铁上盖综合体的振动治理、减振方案比选及振震双控改造设计提供参考.

关键词:地铁振动;既有建筑;桁架转换层;减振措施;抗震性能
中图分类号:TU391 **文献标志码**:A

Study on vibration mitigation and seismic performance of existing metro over-track complex structures with inclined truss transfer story

Wang Meng, *Li Hongxia*, *Gan Shurong*, *Yang Weiguo*, *Liu Pei*
(School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Transit-Oriented Development (TOD) has promoted the construction of metro over-track complexes and improved the utilization of urban space. However, metro train-induced loads can propagate into the superstructure, amplifying floor vibration and reducing occupant comfort. Many early over-track complexes are constructed without vibration-isolation bearings at the column bases, while subsequent retrofitting is constrained by structural, spatial, construction, operational, and mainte-

收稿日期:2026-02-25;**修回日期**:2026-06-25
基金项目:北京市自然科学基金(26JL009);国家自然科学基金(52478491)
Foundation items: Beijing Municipal Natural Science Foundation(26JL009); National Natural Science Foundation of China (52478491)
第一作者:王萌(1985—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,博士生导师.研究方向为地铁上盖综合体结构振震双控技术.**email**: wangmeng@bjtu.edu.cn.

引用格式:王萌,李红霞,甘殊荣,等.带斜杆式桁架转换层的既有地铁上盖综合体结构减振与抗震性能研究[J].北京交通大学学报,2026,50(4):142-156.
Wang Meng, Li Hongxia, Gan Shurong, et al. Study on vibration mitigation and seismic performance of existing metro over-track complex structures with inclined truss transfer story[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(4): 142-156. (in Chinese)

nance requirements, leaving few feasible mitigation options. To address excessive metro-induced vibration in existing buildings, this study examines an existing metro over-track complex with an inclined-member truss transfer story. A three-dimensional finite element model of the soil-tunnel-building system is established, and the modeling approach is validated against field measurements and results reported in the literature. Two post-installed vibration mitigation measures which include steel-spring floating floors and elastic supports are then proposed. Their effectiveness is evaluated using acceleration time-history responses, one-third-octave vibration levels, and relevant vibration-control standards. Dynamic elastoplastic analyses are also performed to investigate the effects of the retrofits on the seismic performance of the existing complex. The results show that vibration levels exceed the prescribed limits on several residential floors of the original structure, demonstrating the need for targeted mitigation. Both steel-spring floating floors and elastic supports effectively reduce the vertical vibration response and improve occupant comfort without compromising the overall seismic performance of the original structure. Considering mitigation effectiveness, economy, constructability, and the spatial constraints of existing buildings, the steel-spring floating floor should preferably be installed on the first floor of the superstructure, with a slab thickness of 100～150 mm. For the elastic-support system, a target natural frequency of 3～5 Hz is recommended. These findings provide a basis for vibration control, retrofit-scheme selection, and integrated vibration and seismic control of existing metro over-track complexes with truss transfer stories.

Keywords: metro-induced vibration; existing buildings; truss transfer story; vibration mitigation measures; seismic performance

以城市轨道交通为导向的地下空间开发,已成为解决城市交通问题的重要策略[1].截至2025年12月31日,我国已有54个城市开通运营城市轨道交通线路343条,总运营里程达11 710.3 km[2].基于公共交通为导向的发展模型(Transit-Oriented Development,TOD),地铁上盖综合体建设工程逐年增多[3-5].然而,此类综合体结构普遍面临上盖物业开发与下部车辆段开发不同步、建筑功能差异导致结构柱网与层高不一致、底部结构柱网跨度大以及剪力墙落地受限等问题[6-7].因此,通常需在底部结构与上部结构之间设置转换层,其中斜杆式桁架转换层因其刚度突变小、传力途径明确、结构空间占用面积小等优点被广泛应用于地铁上盖高层建筑[6-7],且上盖平台与转换层的结构设计能够在一定程度上减弱车致振动的向上传播[8].地铁上盖综合体通常包括地下空间、地上建筑两部分,地下空间多用于城市轨道交通、停车场及商圈建设,地上建筑则多为商业办公、住宅、酒店,其中住宅对振动尤为敏感,对减振降噪的要求也更为苛刻[9-12].

目前,国内外学者对于轨道交通领域的研究多集中于新建建筑的减隔振技术,且主要聚焦于基底或整体隔振.文献[13]通过整体浮置法和隔振垫现场测试了车致振动的隔离效果;文献[14-15]系统研究了厚层橡胶支座(Thick Rubber Bearing,TRB)在地铁上盖建筑减振中的应用,并深入剖析了其受压与受拉力学性能;文献[16]利用数值模型评估了隧道内浮置板系统对邻近建筑的减振影响;文献[17]研发了一种串联橡胶与弹簧的新型三维隔振支座,以期实现微振动与地震的双重控制.这些研究为新建建筑的隔振设计提供了成熟的方案.然而,早期既有综合体结构通常未在柱底设置隔振支座,且柱底多与基础整体现浇并形成刚性连接,导致传统基底整体隔振技术难以直接应用,实施难度大、成本高[18].

针对既有建筑的减振需求,已有研究对常规减振措施的工程适用性展开了评估.如文献[19]针对浅埋地铁运行引起既有建筑振动,对比了改变结构振动特性、浮置地板隔振、建筑物整体隔振3种常用的振动治理方案并分析其适用性;文献[20]针对既有建筑,讨论了轨道减振技术、屏障隔振、浮置地板、整体隔振的适用性.然而,现有研究仍存在以下不足:一方面,研究大多停留在减振概念的定性讨论或常规结构的局部应用阶段,对于底部缺乏隔振支座且含复杂桁架转换层的既有综合体,往往缺乏基于土体-隧道-建筑全系统的定量分析;另一方面,针对带桁架转换层建筑的研究多聚焦于抗震性能[21-26],在既有建筑空间受限的前提下,缺少对地铁振动、地震的双控研究.

针对地铁振动引发的既有建筑振动超标问题，本文以带斜杆式桁架转换层的地铁上盖既有建筑为研究对象，提出增设钢弹簧浮置板与转换层弹性支撑2种减振改造方案．通过有限元分析软件ABAQUS建立“土体-隧道-建筑”三维有限元模型，系统研究了2种减振措施的减振效果，并根据振动控制标准对其减振效果进行评估，同时分析了增设减振措施后对既有建筑抗震性能的影响，为既有地铁上盖综合体减振设计提供参考依据．

1 有限元模型的建立与验证

1.1 有限元模型的建立

1.1.1 模型概况

以某既有综合体为模型案例，模型包括下部商业底盘和上部住宅塔楼．下部底盘共2层，层高为4.2 m，平面尺寸为56 m×40 m，X方向布置7跨，Y方向布置5跨；上盖塔楼共8层，层高为3.6 m，平面尺寸为24 m×24 m，X方向布置6跨，Y方向布置3跨；桁架转换层布设在底盘二层．楼面恒载5 kN/m^2，活载3 kN/m^2．此既有综合体正下方修建了一条地铁线路，隧道埋深为7 m，直径为6.2 m，建立土体-隧道-既有综合体三维有限元模型，如图1所示．

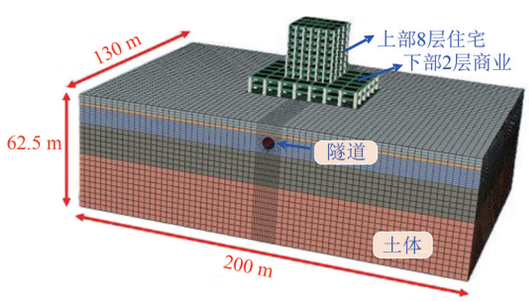


图1 土体-隧道-建筑三维有限元模型

Fig.1 Three-dimensional finite element model of soil-tunnel-building system

1.1.2 参数选取

基于北京海淀区地勘资料，将土体合并简化为5层[27]，土体物理参数如表1所示．土体、衬砌、轨道板、建筑底板均采用8节点线性六面体单元C3D8R模拟；梁柱均采用2节点空间线性梁单元B31模拟，能够较好地描述梁柱的弯曲和轴向行为；楼板采用4节点曲壳单元S4R模拟，能够准确模拟楼板的弯曲和剪切行为；柱子材料为C50混凝土，梁板材料为C30混凝土，梁柱钢筋采用*Rebar关键字插入，楼板配筋采用*Rebar Layer插入．混凝土材料本构模型采用UConcrete02，钢筋材料的本构模型采用USteel02，并通过子程序PQ-fiber调用，以实现对混凝土及钢筋非线性行为的模拟．

表1 土体物理参数

Tab.1 Physical properties of the soil layers

土层编号	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/m
1	1 970	154	0.39	4.5
2	2 000	190	0.45	2.0
3	2 020	354	0.31	9.0
4	1 990	528	0.32	17.0
5	2 050	601	0.34	30.0

模型各单元参数如表2所示．根据相关研究[28-29]，有限元网格的大小会影响计算精度，当有限元网格尺寸取值范围为土层剪切波长的1/12～1/6时，可取得较准确的结果．为兼顾计算效率及结果的准确性，本文的网格尺寸取为1～3 m，土体尺寸竖向取62.5 m，垂直线路方向取200 m，平行线路方向取130 m，本文的土体-隧道-建筑共划分128 908个网格单元．

表2 模型各单元参数

Tab.2 Physical properties of the model components

名称	厚度/m	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
隧道衬砌	0.35	2 500	35.0	0.2
轨道板	0.35	2 500	35.0	0.2
建筑底板	0.50	2 360	30.0	0.2
梁	—	2 360	30.0	0.2
柱	—	3 200	34.5	0.2
桁架	—	2 360	30.0	0.2
下部楼板	0.20	2 360	30.0	0.2
上部楼板	0.12	2 360	30.0	0.2

1.1.3 土体边界条件的处理及阻尼特性

为使结果更准确，拟采用黏弹性人工边界，以避免地铁所致振动波在有限元模型边界处产生反射叠加问题[30]，采用Rayleigh阻尼作为结构整体阻尼特性输入模型当中，将Rayleigh阻尼简化为质量矩阵与刚度矩阵的组合[30]，表达式为

$$\boldsymbol{C}=\alpha[\boldsymbol{M}]+\beta[\boldsymbol{N}] \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{C}$为阻尼矩阵；$\boldsymbol{M}$为质量矩阵；$\boldsymbol{N}$为整体刚度矩阵；α、β分别为质量矩阵系数与刚度矩阵系数，表达式分别为

$$\alpha=\frac{2(\xi_i\omega_j-\xi_j\omega_i)}{(\omega_j^2-\omega_i^2)}\omega_i\omega_j \tag{2}$$

$$\beta=\frac{2(\xi_j\omega_j-\xi_i\omega_i)}{(\omega_j^2-\omega_i^2)} \tag{3}$$

式中：ω_i、ω_j分别为i阶和j阶振型的圆频率；ξ_i、ξ_j分别为i阶和j阶振型的阻尼比．地铁振动频率通常为10～80 Hz，本文取第i阶振型频率f_i=10 Hz，第j阶振型频率f_j=80 Hz，并假定这两阶振型的阻尼比均为5%，即$\xi_i=\xi_j=0.05$．

1.1.4　列车荷载的施加

本文采用地铁列车类型为B型,每辆车包括1个车体、2个转向架和4个轮对[31].利用北京交通大学自编软件DRVB[28],计算获得普通道床列车荷载数据,施加到轨道板上以模拟列车经过时所产生的激励荷载,普通道床列车荷载时程如图2所示,所模拟的地铁列车运行速度为80 km/h[27].采用隐式动力学分析模块,输入的地铁列车荷载频率为256 Hz,时间积分步长为1/256 s,以保证计算稳定及高频振动所需精度,总计算时程为8 s,以涵盖振动响应全过程.

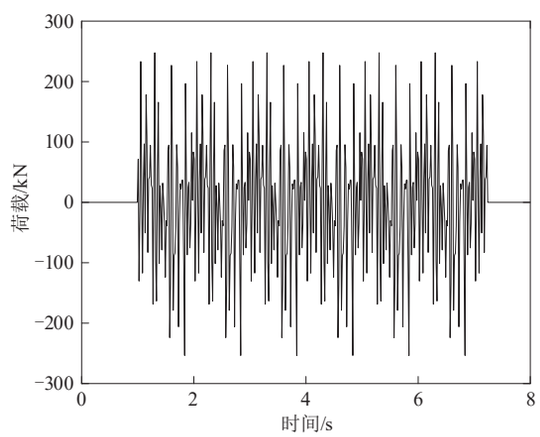


图2　列车荷载时程

Fig.2　Train-load time history

1.2　基于实测数据的建模方法验证

为确保1.1节有限元模型的可靠性,对其核心建模方法的准确性进行验证.选取已有实测数据支撑的文献[27]与文献[32]中的结构作为验证对象,采用与1.1节完全相同的建模方法进行验证.在计算研究中,本文模型与验证模型在以下共性关键技术上保持了高度一致:相同的材料本构关系与单元类型选取原则;消除波动反射的黏弹性人工边界条件设置;结构整体Rayleigh阻尼的选取;列车动荷载的输入方式及隐式动力学求解模块.通过论证该通用建模方法在复现既有文献实测数据上的准确性,进而证明1.1节基于同等材料本构模型、边界条件、阻尼选取和荷载输入规则所构建的土体-隧道-综合体全系统三维有限元模型是合理且可靠的.

参照文献[27],在ABAQUS中建立隧道-土体-建筑物全系统模型,采用与1.1.4节一致的列车荷载输入方法,将文献[27]中的列车竖向动力荷载时程按列车运行方向施加于轨道板对应轮轨作用位置,并采用隐式动力学分析模块进行时程计算,时间积分步长取1/256 s,总计算时程取8 s,以完成全系统模型验证.地表提取点S0~S3及隧道壁提取点T1的分布如图3所示.将数值模拟计算得到的隧道壁加速度峰值、利用"1/3倍频程法"[34]计算得到的隧道壁振级与文献[27]计算结果、实测结果以及文献[33]附录所列振源强度参考值进行对比,如表3所示,结果吻合较好.将数值模拟计算得到的地表各提取点的振动量级,与文献[27]数值计算结果、实测结果进行对比,如图4所示,结果吻合较好.综上,土体-隧道-建筑有限元模型建模方法具有一定可靠性,可为后续分析计算奠定基础.

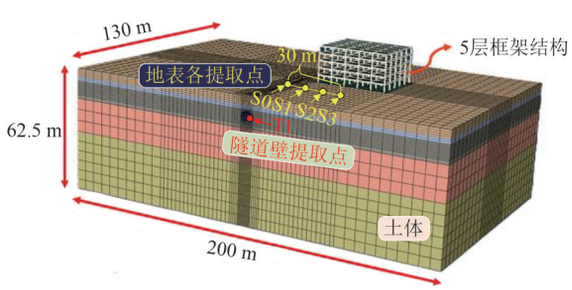


图3　提取点选取

Fig.3　Locations of response extraction points

表3　隧道壁提取点T1振级对比

Tab.3　Comparison of vibration levels at tunnel-wall extraction point T1

数据类型	振动控制措施	地铁线路(北京市)	振级/dB	加速度峰值/(m/s²)
文献[27]实测结果	普通整体道床	15号线	86.64	0.309
文献[33]振源强度参考值	普通整体道床	5、6、7、9、10、14号线	78.8~87.5	—
文献[27]数值计算结果	普通整体道床	—	86.12	0.302
模型验证数值计算结果	普通整体道床	—	84.68	0.327

1.3　地震作用下土体-建筑物有限元模型验证

在ABAQUS中建立文献[34]中的土体-建筑有限元模型如图5所示.图5中,上部为一个12层框架结构,下部为土体.参照文献[34]相关参数,在土体底部输入IZMIT180地震波,调幅至100 cm/s²,持续时间30 s,时间间隔0.02 s,进行模态分析与时程分析.模态分析比较了前15阶自振频率,对比结果如图6所示,模拟自振频率与文献[34]自振频率吻合良好.时程分析对比了各层峰值加速度曲线,对比结果如图7所示,模拟各层峰值加速度大小及形状均与文献[34]吻合良好.综合模态分析及时程分析的对比结果,验证了有限元模型建模方法的合理性.

综合1.2节的地铁振动响应验证与本节的地震

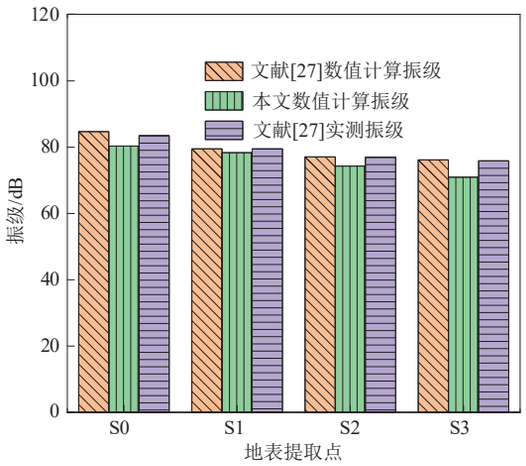


图 4 地表提取点振级对比

Fig.4 Comparison of vibration levels at surface extraction points

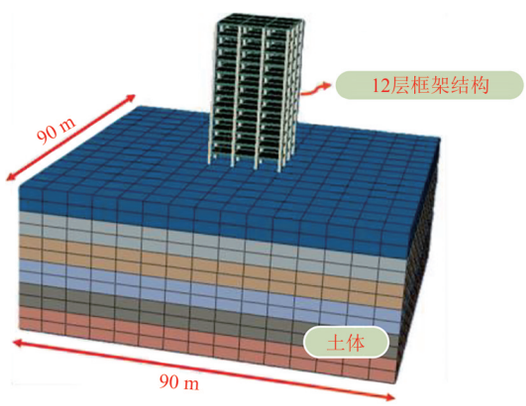


图 5 土体-建筑物有限元模型

Fig.5 Finite element model of the soil - building system

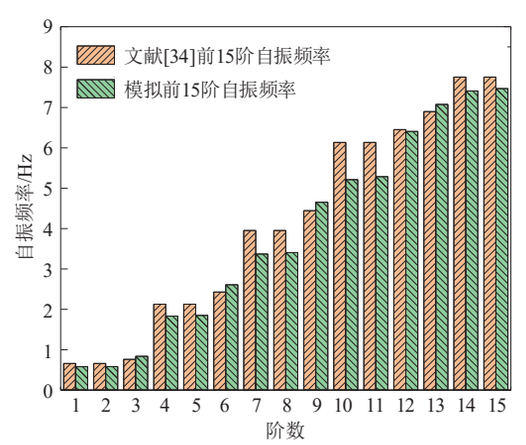


图 6 自振频率对比

Fig.6 Comparison diagram of natural vibration frequency

动时程分析结果可知，本文提取的共性关键建模技术及数值求解方法具备高度的准确性与适用性.这充分表明，本文构建的土体-隧道-建筑全系统有限元模型能够可靠地模拟复杂动力激励下的结构响应，为后续的减振措施效果及抗震性能评估奠定了坚实的数值计算基础.

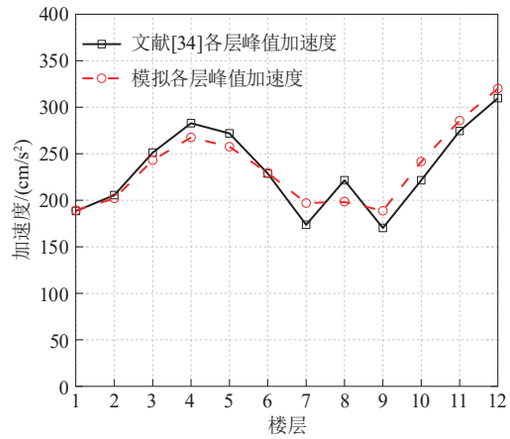


图 7 峰值加速度对比

Fig.7 Peak acceleration comparison diagram

2 既有地铁上盖综合体振动响应分析

2.1 振动控制标准

根据文献[35]及文献[36]可知，既有综合体所在区域可按混合区、商业中心区考虑.其中，文献[35]规定该类区域垂向 Z 振级限值为昼间 75 dB、夜间 72 dB；文献[36]规定该类区域分频最大振级限值为昼间 70 dB、夜间 67 dB.考虑夜间限值更为严格，本文采用分频最大振级夜间限值 67 dB 和垂向 Z 振级夜间限值 72 dB 作为振动控制参考值.

2.2 原始结构振动响应分析

利用 ABAQUS 对土体-隧道-既有综合体进行振动响应分析.为表征结构沿竖向的振动传递规律，选取各层楼板几何中心处作为振动响应提取点，其中，P1、P2 分别为下部商业底盘一层和二层（桁架转换层）楼板中心提取点，F1～F8 分别为上部住宅第 1～8 层楼板中心提取点.对其进行 1/3 倍频程分析并绘制各提取点的分频最大振级，以评估地铁振动下既有建筑的响应，如图 9、图 10 所示.

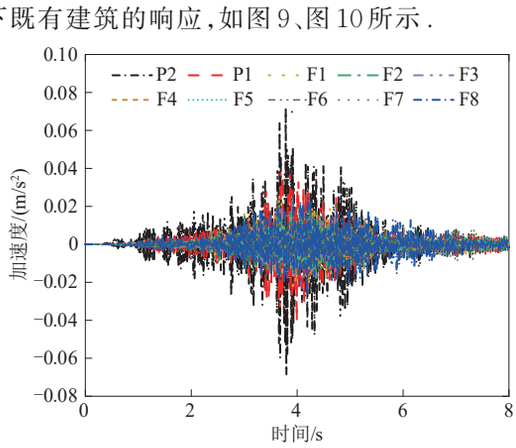


图 8 原始工况各提取点加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration time histories at the extraction points for the original structure

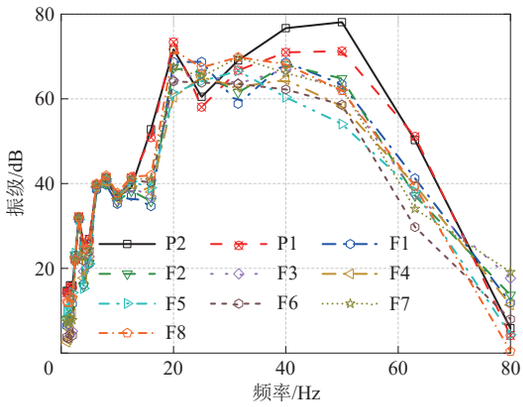


图 9　原始工况楼层各提取点 1/3 倍频程图

Fig.9　One-third-octave spectra diagram at the extraction points for the original structure

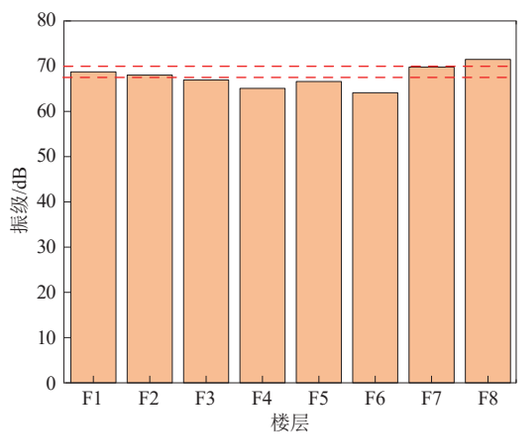


图 10　原始工况各楼层提取点分频最大振级

Fig.10　Maximum frequency-band vibration levels at floor extraction points for the original structure

由图 10 可知,在原始工况下,上部 F1 层的分频最大振级为 68.74 dB,F2 层为 68.02 dB,F7 层为 69.79 dB,F8 层为 71.49 dB,均超过文献[36]标准限值 67 dB.为确保上部住宅的人员舒适性,需对建筑进行减振设计.

3　既有结构减振措施效果分析

既有综合体微振动治理工程常受制于空间净高、结构条件等物理边界及经济指标,单一减振方案的普适性受限.本文选取钢弹簧浮置地板与转换层弹性支撑 2 种方案开展对比研究.其中,浮置地板作为局部隔振措施,结构干预度与建造成本较低,但需占用室内净高;转换层弹性支撑通过在振动传递路径上加装弹簧装置实现全局减振,不占用建筑净高,但涉及核心受力构件改造,施工风险与成本相对较高.通过对上述 2 种技术方案的定量评估,可为具备不同工程条件的既有上盖建筑减振设计提供理论依据与方案比选参考.

3.1　基于浮置地板措施的既有建筑减振效果分析

3.1.1　浮置地板措施减振原理

针对既有综合体上部住宅的振动超标问题,本文提出增设钢弹簧浮置地板的减振方案.尽管浮置地板在振动控制中已有应用,但将其引入既有建筑的不同位置以应对地铁诱发振动,可改变应用场景与系统受力边界.为重点评估该措施在此类复杂既有结构特定位置的适配性与全局减振效能,建立单自由度系统隔振模型,其动力学方程为

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=-m\ddot{x}_{\mathrm{g}} \tag{4}$$

式中:m、c、k 分别为隔振体系的质量、阻尼系数、刚度系数;x、$\dot{x}$、$\ddot{x}$ 分别为上部结构的竖向位移、速度和加速度;$\ddot{x}_{\mathrm{g}}$ 为基础振动加速度.减振效果可用传递比 ζ(传递力与干扰力的比值)来表示[37].

振动传递率随频率比变化曲线如图 11 所示.由图 11 可知:当外部激励频率 ω 与隔振体系的自振频率 ω_0 满足 $\omega/\omega_0\geqslant\sqrt{2}$ 时[38],此时振动的传递力小于干扰力,即可达到减振效果.浮置地板通过在原有混凝土地面上增加一层可浮置的混凝土板,并通过弹性支撑元件进行支撑[19],这种设计能够将地面与楼板结构有效隔离,形成一层振动隔离层,从而降低振动的传递[38].钢弹簧因固有频率较低,是弹性支撑元件的一种常见选择[39].此措施不仅可以确保建筑的安全性和使用功能,还能提升人员舒适性.

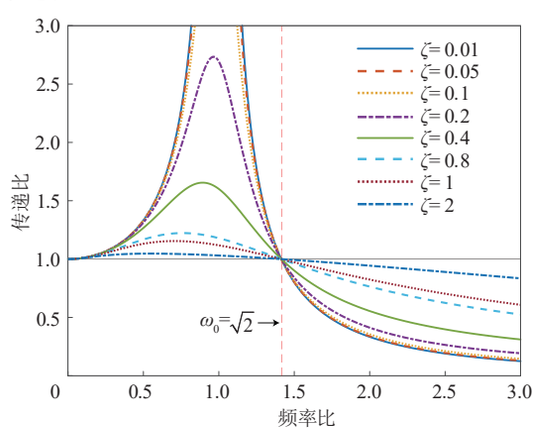


图 11　振动传递率随频率比变化曲线

Fig.11　Vibration transmissibility versus frequency ratio

3.1.2　浮置地板构造

根据既有建筑结构形式,参考文献[40],设置 2 种工况布置方案:工况 1 在既有建筑底盘一层布设钢弹簧浮置地板;工况 2 在上盖建筑首层布设钢弹簧浮置地板,钢弹簧浮置地板布设如图 12 所示.该浮置地板系统采用典型的多层复合构造,自下而上依次为:既有结构承重楼板、由矩阵式布设钢弹簧隔

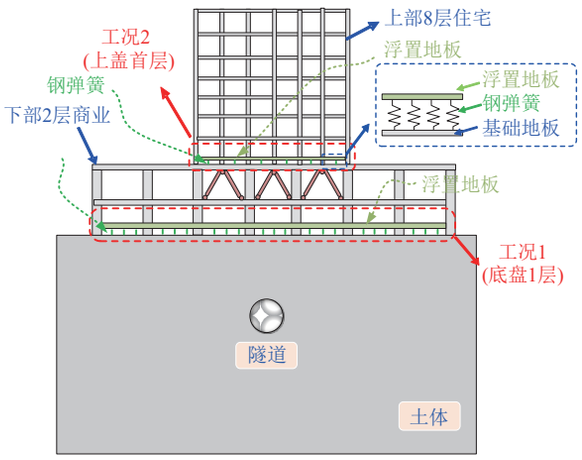


图 12　钢弹簧浮置地板布设

Fig.12　Layout diagram of steel-spring floating floor

振器的弹性隔振层，以及上盖的现浇钢筋混凝土浮置面层．合理选择浮置板的材料与钢弹簧支座的刚度是减振的关键．为取得较好的减振效果，设定目标频率为 3 Hz[41]，钢弹簧支座竖向刚度分别为

$$k_{总}=m\left(2\pi f_{n}\right)^{2} \tag{5}$$

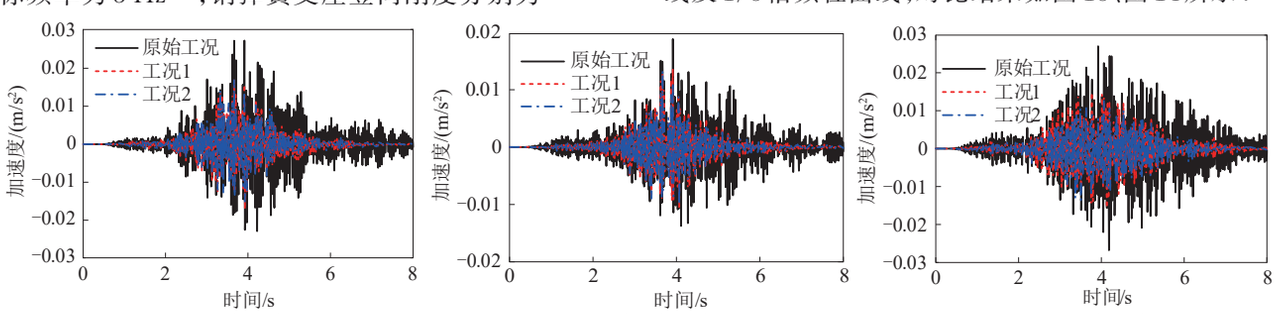
$$k_{单}=k_{总}/x \tag{6}$$

式中：$k_{总}$ 为钢弹簧总刚度；$k_{单}$ 为单个钢弹簧的刚度；f_{n} 为隔振系统目标频率；x 为钢弹簧数量．

采用 C30 混凝土作为浮置板材料，该材料具备良好的耐久性和较高的抗压强度；本文的既有综合体，上部为普通住宅，属于轻度振动敏感场所，通常浮置板厚度在 100～200 mm[19-20]，综合考虑上部荷载和减振需求，浮置板厚度设计为 200 mm．工况 1 共布设 294 个钢弹簧，纵横向间距均为 2 m，刚度为 1 276 N/mm；工况 2 共布设 115 个钢弹簧，纵横向间距均为 2 m，刚度为 839 N/mm．

3.1.3　浮置地板布置位置对减振效果的影响

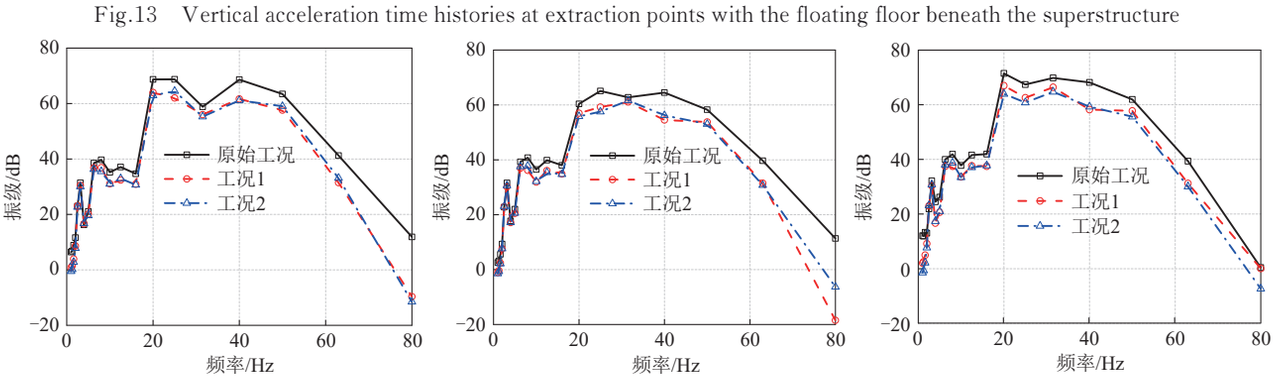
在 ABAQUS 中采用 SPRING 单元模拟钢弹簧，施加列车荷载进行振动响应分析；对比各工况下上盖建筑首层、中层、顶层楼板中心点的加速度时程曲线及 1/3 倍频程曲线，对比结果如图 13、图 14 所示．



（a）首层加速度时程图　（b）中层加速度时程图　（c）顶层加速度时程图

图 13　浮置地板下上盖建筑各提取点的竖向加速度时程图

Fig.13　Vertical acceleration time histories at extraction points with the floating floor beneath the superstructure



（a）首层1/3倍频程图　（b）中层1/3倍频程图　（c）顶层1/3倍频程图

图 14　浮置地板下上盖建筑各提取点的 1/3 倍频程图

Fig.14　One-third-octave spectra at extraction points in the superstructure with the floating floor

由图 13 可知：①在既有综合体底盘一层、上部首层设置钢弹簧浮置地板后，上部建筑各层的加速度峰值明显减小．②与原始工况相比，工况 1 上部建筑首层加速度峰值减小值为 0.010 3 m/s²，降幅达 37.61%；中层减小值为 0.005 3 m/s²，降幅达 28.01%；顶层减小值为 0.010 7 m/s²，降幅达 39.81%．③与原始工况相比，工况 2 首层减小值为 0.009 8 m/s²，降幅达 35.91%；中层减小值为 0.005 6 m/s²，降幅达 29.62%；顶层减小值为 0.013 3 m/s²，降幅达 49.34%．④2 种工况下上部建筑加速度峰值的减小值差异较小，但工况 1 成本较高．

由图 14 可知：与原始工况相比，工况 1 与工况 2

在高频段(20～80 Hz)振级降低较为明显;低频段(0～20 Hz)在10 Hz、15 Hz处振级减小较为明显.利用1/3倍频程法计算得到上盖F1～F8层各提取点的垂向Z振级,如表4所示.由表4可知:与原始工况相比,工况1、工况2上部建筑各提取点的垂向Z振级均有所降低;工况1上部建筑8层垂向Z振级平均降低4.47 dB,工况2平均降低5.28 dB,2种工况上部建筑垂向Z振级的平均降低值仅相差0.81 dB,差异较小.

表4　钢弹簧浮置地板下各工况上盖建筑各提取点的垂向Z振级

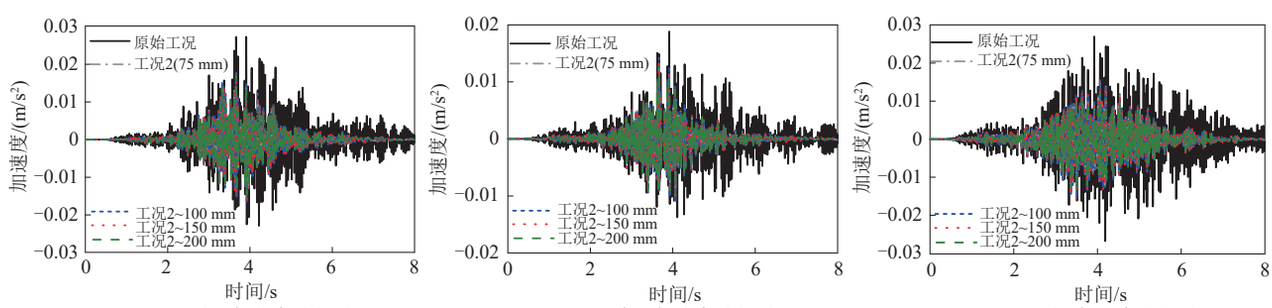
Tab.4　Vertical Z-weighted vibration levels at superstructure extraction points for each steel-spring floating-floor case

工况	F1振级/dB	F2振级/dB	F3振级/dB	F4振级/dB	F5振级/dB	F6振级/dB	F7振级/dB	F8振级/dB
原始工况	67.76	66.42	64.95	62.93	63.32	63.63	67.16	69.79
工况1	62.49	61.32	59.99	58.40	59.85	60.34	62.56	65.23
工况2	62.28	60.90	59.21	57.90	58.85	59.02	62.71	62.88

综上所述,布设钢弹簧浮置地板,可以显著提升上部住宅的人群舒适度.工况1与工况2在减振效果上差异较小,2种布置方案均可满足上部建筑的减振需求.然而,工况1布置在底盘一层,所需的钢弹簧数量显著增加,导致其成本较高.因此,综合考虑减振效果和经济性,建议选用工况2的方案,不仅能满足减振要求,还能有效降低材料成本,提升经济效益.

3.1.4　浮置板刚度对减振效果的影响

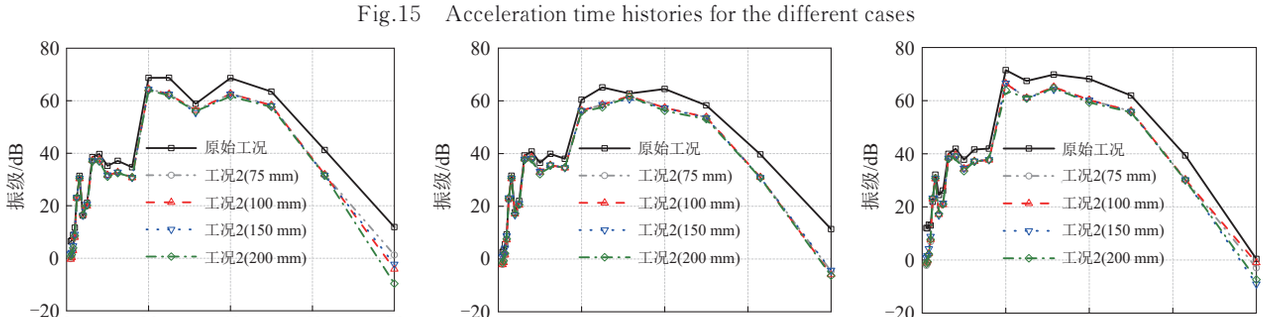
为分析浮置板刚度变化对减振效果的影响,在工况2的基础上,设置浮置板厚度分别为75 mm、100 mm、150 mm、200 mm,对各工况进行振动响应分析,上盖建筑首层、中层、顶层的加速度时程曲线及1/3倍频程曲线如图15、图16所示.



（a）首层加速度时程图　（b）中层加速度时程图　（c）顶层加速度时程图

图15　各工况下加速度时程曲线

Fig.15　Acceleration time histories for the different cases



（a）首层1/3倍频程图　（b）中层1/3倍频程图　（c）顶层1/3倍频程图

图16　各工况下1/3倍频程图

Fig.16　One-third-octave spectra for the different cases

由图15可知:①随着浮置板刚度增加,上盖建筑加速度峰值逐渐降低,当浮置板厚度从75 mm增至200 mm,上盖建筑首层加速度峰值由0.017 9 m/s²减小至0.017 5 m/s²;中层由0.014 3 m/s²减小至0.013 3 m/s²;顶层由0.015 6 m/s²减小至0.013 7 m/s².②浮置板厚度从75 mm增加至200 mm时,加速度峰值的减小幅度较小.

由图16可知:①浮置板刚度变化对各频段振级的影响较为有限.各工况垂向Z振级随着浮置板刚度增加,上部建筑各提取点垂向Z振级逐渐减小,浮置板厚度从75 mm增至200 mm,上盖建筑首层的垂向Z振级由62.84 dB减小至62.28 dB;中层由58.44 dB减小至57.90 dB;顶层由64.46 dB减小至62.88 dB.②与原始工况相比,浮置板厚度为75 mm

时，上部建筑各层的垂向 Z 振级平均减小 4.59 dB；浮置板厚度为 100 mm 时，平均减小 4.61 dB；浮置板厚度为 150 mm 时，平均减小 4.98 dB；浮置板厚度为 200 mm 时，平均减小 5.28 dB.③浮置板刚度的增加对上部建筑各层的垂向 Z 振级影响也较为有限.综上所述，浮置板刚度变化对减振效果的影响较为有限.浮置板过厚容易影响既有建筑的使用空间，建议工况 2 下浮置板厚度设置为 100～150 mm，可满足上部住宅人群的舒适性要求.

3.1.5　钢弹簧支座竖向刚度对减振效果的影响

为研究钢弹簧支座竖向刚度对减振效果的影响，在工况 2 的基础上调整目标自振频率为 5 Hz，其余参数与工况 2 保持一致，根据式(5)、式(6)可计算得到单个钢弹簧支座的竖向刚度为 2 331 N/mm.通过有限元分析，得到各工况下上盖建筑首层、中层、顶层的加速度时程曲线及 1/3 倍频程曲线如图 18、图 19 所示.

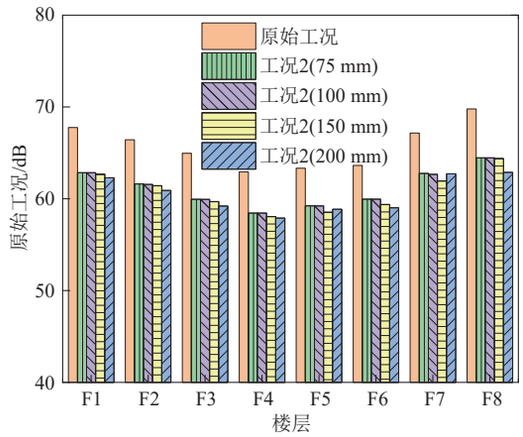
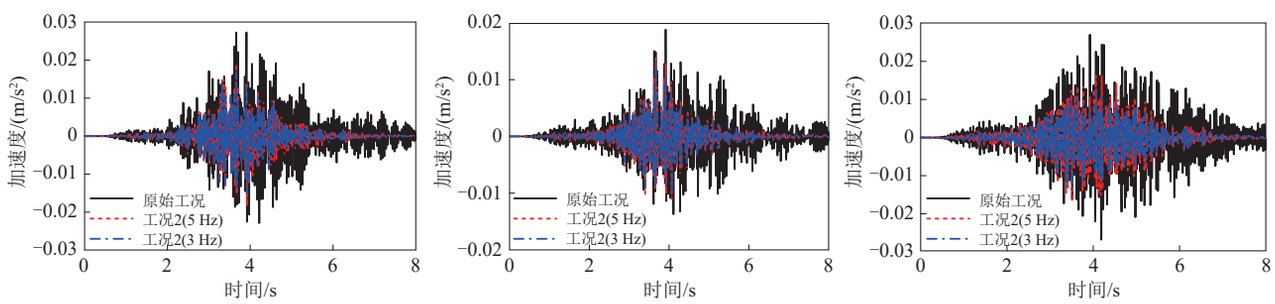


图 17　各工况上盖建筑各提取点的垂向 Z 振级曲线

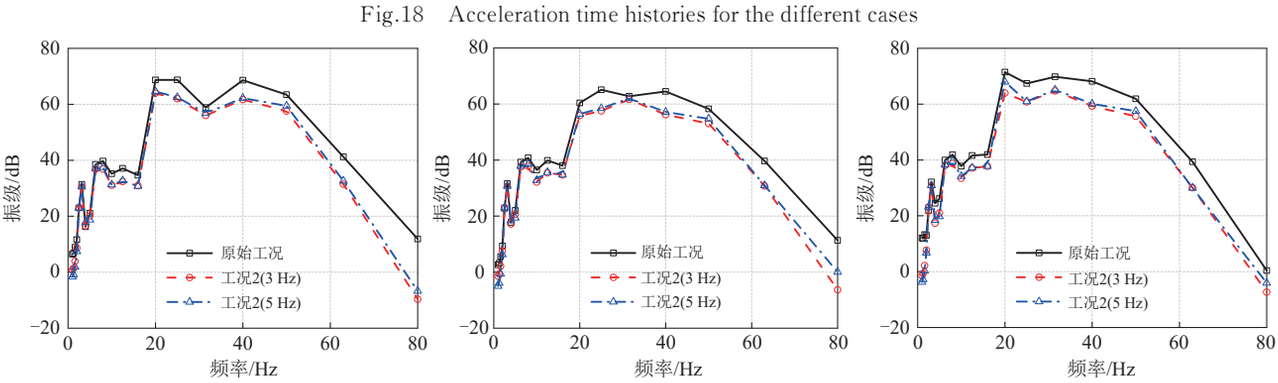
Fig.17　Vertical Z-weighted vibration levels at superstructure extraction points for the different cases



（a）首层加速度时程图　（b）中层加速度时程图　（c）顶层加速度时程图

图 18　各工况下加速度时程曲线

Fig.18　Acceleration time histories for the different cases



（a）首层1/3倍频程图　（b）中层1/3倍频程图　（c）顶层1/3倍频程图

图 19　各工况下 1/3 倍频程图

Fig.19　One-third-octave spectra for the different cases

由图 18 可知：随着目标自振频率的增加，上盖建筑的加速度峰值逐渐增大，当目标自振频率由 3 Hz 增加至 5 Hz，上盖建筑首层的加速度峰值由 0.017 5 m/s^2 增大至 0.019 1 m/s^2；中层由 0.013 3 m/s^2 增大至 0.013 8 m/s^2；顶层由 0.013 7 m/s^2 增大至 0.016 8 m/s^2.由图 19 可知，随着目标自振频率增加，低频段的振动响应变化较小，高频段的振动响应逐渐增大.

各提取点垂向 Z 振级曲线如图 20 所示.由图 20 可知：①各工况上盖建筑各层的垂向 Z 振级随着目标自振频率的增大，上盖建筑各层的垂向 Z 振级逐渐增大；当目标自振频率由 3 Hz 增加至 5 Hz 时，结构首层的垂向 Z 振级由 62.28 dB 增加至 62.87 dB；中层由 57.90 dB 增加至 58.55 dB；顶层由 62.88 dB 增加至 65.35 dB.②与原始工况相比，当目标自振频率为 3 Hz 时，上部建筑各层的垂向 Z 振级平均减小

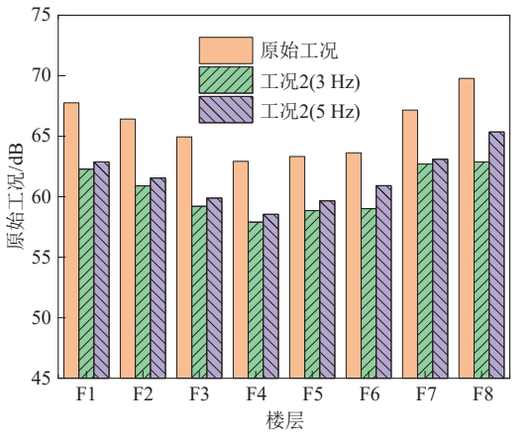


图 20　各提取点垂向 Z 振级曲线

Fig.20　Vertical Z-weighted vibration levels at the extraction points

5.28 dB;当自振频率为 5 Hz 时,平均减小 4.26 dB.综上所述,在对减振效果要求较高的情况下,建议优先选取较低的自振频率,以确保达到预期减振效果.

3.2　基于弹性支撑措施的既有建筑减振效果分析

3.2.1　弹性支撑措施减振原理及方案

为提高转换层上部住宅的人群舒适度,提出在桁架转换层中增设弹性支撑的减振方案,结合本工程的受限空间特点进行针对性的结构布置.根据相关规范[42-46]及建筑的结构特点,建议在桁架转换层中增设竖杆,并在竖杆底部安装钢弹簧支座,构成弹性支撑系统,如图 21 所示.该弹性支撑系统采用典型的“竖杆-弹簧”串联构造,其整体物理空间布置主要依托原有的 V 型斜杆桁架,通过在桁架内部增设竖向传力杆件,并于新增竖杆的底部节点处串接钢弹簧支座共同构成.该方案具有以下特点:在转换层中新增大截面竖杆以提高结构阻抗[8, 47],钢弹簧支座通过调整系统固有频率[48],进一步优化减振性能.

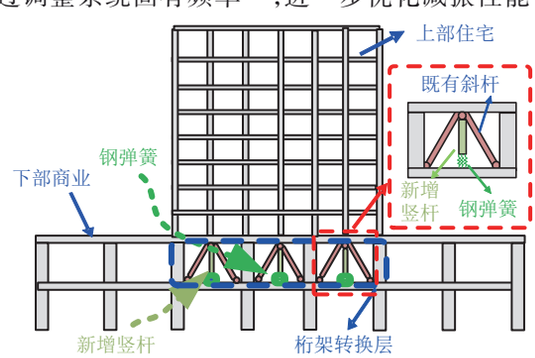


图 21　弹性支撑措施方案图

Fig.21　Schematic diagram of the elastic-support retrofit

3.2.2　减振设计

竖杆布置应根据建筑结构特点以及相关设计规范[42-46]进行,以确保符合规范要求.鉴于研究对象为既有建筑,竖杆设计需避免显著增加建筑重量,以免影响原有结构的抗震性能.基于上述要求,新增竖杆采用 Q345 材料,截面尺寸为 800 mm×800 mm×50 mm 的箱型截面,经 PKPM 软件验算,所提出的竖杆布置方案符合结构设计规范.

钢弹簧支座的竖向刚度需要结合目标自振频率和具体竖向荷载进行计算,其表达式分别为

$$X_a=\frac{g}{4\pi^2 f_n^2} \tag{7}$$

$$K=\frac{F}{X} \tag{8}$$

式中:F 为上部结构的竖向荷载;X_a 为竖向压缩量;K 为单个钢弹簧支座的竖向刚度;g 为重力加速度.

3.2.3　隔振支座竖向刚度对减振效果的影响

为研究钢弹簧支座竖向刚度对减振效果的影响,设定目标自振频率分别为 3 Hz、5 Hz 和 10 Hz,并将其依次定义为工况 6、工况 7 和工况 8.三种工况的竖杆布置形式和最大竖向轴力保持不变,仅改变钢弹簧支座的竖向刚度.根据钢弹簧压缩量一致的原则[49],通过 PKPM 软件计算竖杆底部最大竖向轴力,并根据式(7)、式(8)计算各工况单个钢弹簧支座的竖向刚度,结果见表 5.通过各工况与原始工况的对比,评价弹性支撑措施的减振效果;通过工况 6、工况 7 和工况 8 之间的对比,分析钢弹簧支座竖向刚度及目标自振频率对减振效果的影响.利用 ABAQUS 对各工况进行振动响应分析,得到上盖建筑首层、中层和顶层各提取点的加速度时程曲线及 1/3 倍频程曲线,见图 22、图 23.

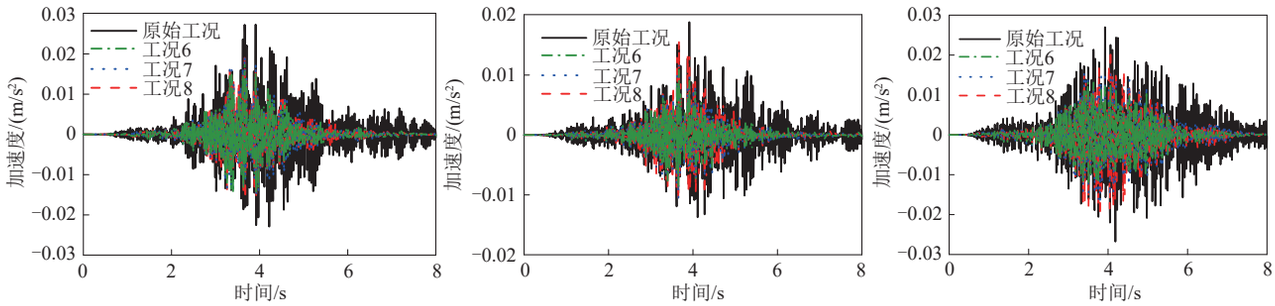
表 5　分析工况

Tab.5　Analysis cases

工况	最大轴力/kN	目标频率/Hz	刚度/(N/mm)	压缩量/mm
工况 6	719	3	25 520	28.2
工况 7	719	5	70 890	10.1
工况 8	719	10	283 562	2.5

由图 22 可知:①与原始工况相比,各工况下上盖建筑各提取点的加速度峰值均明显减小;随着目标自振频率的降低,结构振动响应逐渐降低;②当目标自振频率由 10 Hz 降低至 3 Hz,上部建筑首层的加速度峰值由 0.019 7 m/s^2 降低至 0.018 3 m/s^2;中层由 0.015 6 m/s^2 降低至 0.011 3 m/s^2;顶层由 0.021 4 m/s^2 降低至 0.013 6 m/s^2.

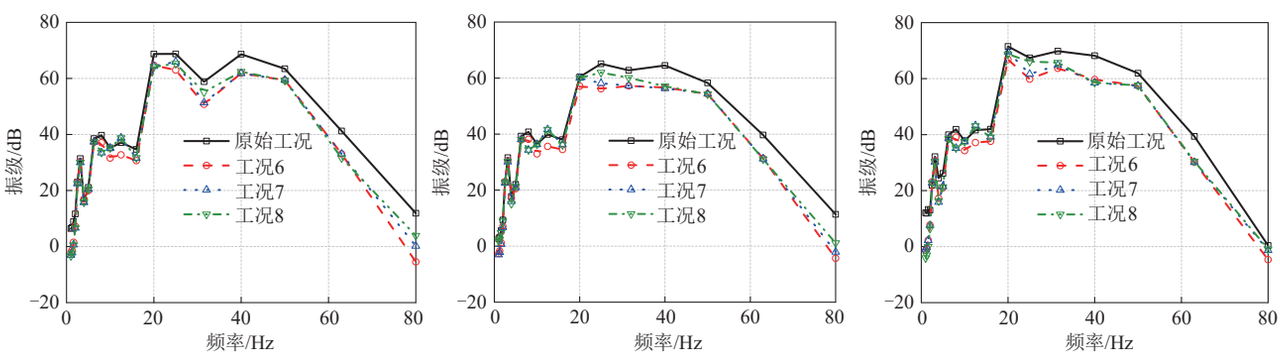
由图 23 可知:当自振频率为 3 Hz 及 5 Hz 时,20～80 Hz 频段振动明显减小,且目标频率为 3 Hz 时,10～20 Hz 的低频振动也得到有效抑制;当自振



（a）首层加速度时程图　（b）中层加速度时程图　（c）顶层加速度时程图

图 22　各工况下加速度时程曲线

Fig.22　Acceleration time histories for the different cases



（a）首层1/3倍频程图　（b）中层1/3倍频程图　（c）顶层1/3倍频程图

图 23　各工况下 1/3 倍频程图

Fig.23　One-third-octave spectra for the different cases

频率为 10 Hz 时，中高频成分衰减不明显，10～20 Hz 低频段减振效果较差.

各工况上部建筑各提取点的垂向 Z 振级如图 24 所示，由图 24 可知：①随着自振频率降低，垂向 Z 振级降幅逐渐增大；当自振频率由 10 Hz 降低至 3 Hz 时，上部建筑首层的垂向 Z 振级由 63.47 dB 降低至 62.90 dB；中层由 60.36 dB 降低至 56.86 dB；顶层由 66.85 dB 降低至 64.35 dB.②与原始工况相比，当自振频率为 3 Hz 时，上部建筑各层垂向 Z 振级平均减小 5.75 dB；当自振频率为 5 Hz 时，平均减小 4.28 dB；

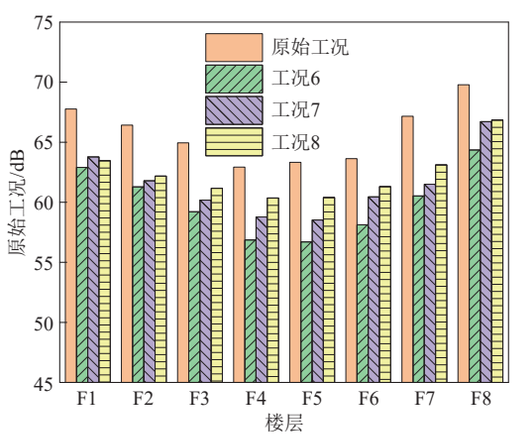


图 24　各工况上盖建筑各提取点垂向 Z 振级曲线

Fig.24　Vertical Z-weighted vibration levels at superstructure extraction points for the different cases

当自振频率为 10 Hz 时，平均减小 3.39 dB. 当目标自振频率为 3 Hz、5 Hz 时，对振动的抑制效果比 10 Hz 明显. 综上所述，通过在既有建筑中增设弹性支撑，可有效减小上部结构的振动响应. 在较低目标自振频率范围内，振动响应得到了有效抑制，而目标自振频率过高则可能无法充分抑制地铁振动响应. 因此，体系目标自振频率取值范围建议选用 3～5 Hz.

4　既有综合体减振后地震响应分析

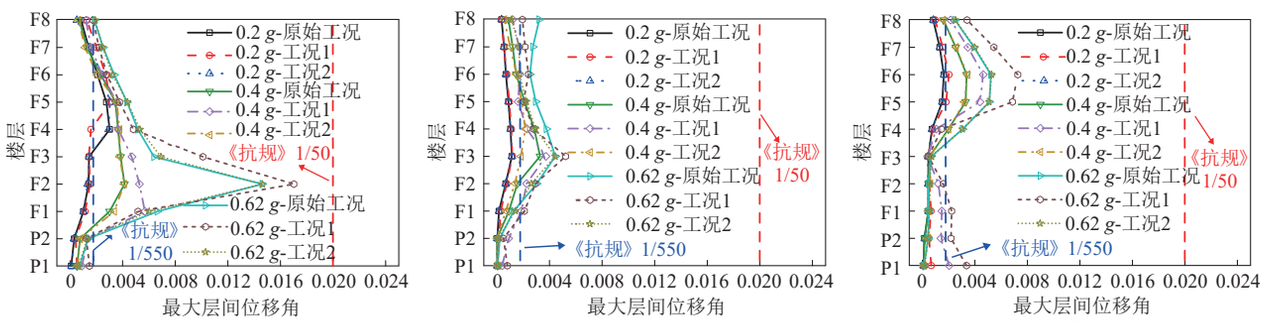
地铁振动下，既有综合体振动超标，影响人员舒适性. 为解决此问题，提出 2 种减振措施，以降低既有综合体振动响应. 同时，为确保这些减振措施不会削弱既有综合体原有的抗震性能，还需分析增加减振措施后对既有综合体抗震性能的影响.

本文结构所处地区的地震条件为：设防烈度 8 度，场地类别Ⅱ类，设计地震分组第一组. 从太平洋地震研究中心（Pacific Earthquake Engineering Research Center，PEER）数据库中选取 Northwest 波、Taft 波、Northern 波 3 条地震波. 时程分析考虑设防地震、罕遇地震和极罕遇地震 3 种地震动强度，3 条地震波的峰值地面加速度（Peak Ground Acceleration，PGA）分别调幅至 0.2g、0.4g 和 0.62g，对应本文采用的加速度幅值分别为 200 cm/s²、400 cm/s²、

620 cm/s^2.在满足地震动三要素的前提下,为提高有限元模型的计算效率,统一设定地震波持续时间为20 s,时间间隔为0.02 s,输入结构柱底,结构水平X、Y方向的加载比例为1∶0.85.

4.1　基于浮置地板措施的既有建筑抗震性能分析

对工况1、工况2进行时程分析.由于篇幅原因,仅给出各楼层X方向的最大层间位移角曲线,如图25所示.文献[46](简称《抗规》)中规定,钢筋混凝土框架结构弹性层间位移角限值为1/550,弹塑性层间位移角限值为1/50.由图25可知:①3条地震波作用下,结构各楼层最大层间位移角均小于规范[46]限制1/50,满足规范要求.②与原始工况相比,工况1部分楼层出现层间位移角放大现象,原因是工况1中钢弹簧浮置板是布置在底盘最下层,使底层质量明显增加,导致变形响应放大;而工况2是布置在上部建筑首层,且浮置板尺寸小于工况1,对整体质量分布影响有限,因此未显著影响结构原本的抗震性能.钢弹簧浮置地板布置位置对结构的抗震性能影响较为明显,底层浮置地板可能引起变形放大,而上盖层浮置地板对整体影响较小.



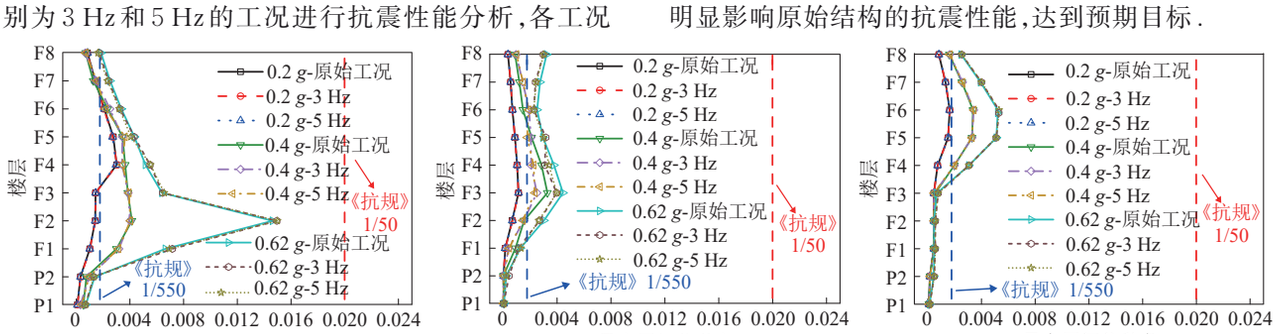
（a）Taft波-最大层间位移角曲线　（b）Northwest波-最大层间位移角曲线　（c）Northern波-最大层间位移角曲线

图25　各工况下最大层间位移角曲线

Fig.25　Maximum interstory drift ratios for the different cases

4.2　基于弹性支撑措施的既有建筑抗震性能分析

3.2.2表明,在地铁振动下建议体系目标自振频率取值范围为3～5 Hz.因此本节对目标自振频率分别为3 Hz和5 Hz的工况进行抗震性能分析,各工况X方向最大层间位移角曲线如图26所示.由图26可知:随着自振频率从3 Hz增加至5 Hz,结构的层间位移角变化并不明显;且与原始工况相比,该方案并未明显影响原始结构的抗震性能,达到预期目标.



（a）Taft波-最大层间位移角曲线　（b）Northwest波-最大层间位移角曲线　（c）Northern波-最大层间位移角曲线

图26　各工况下最大层间位移角曲线

Fig.26　Maximum interstory drift ratios for the different cases

5　结论

本文以带斜杆式桁架转换层的既有地铁上盖综合体为研究对象,分析了钢弹簧浮置地板与弹性支撑方案的减振及抗震性能.研究主要适用于底部无隔振支座且含转换层的同类既有结构,并可分别满足不同层高限制条件下的工程需求.得到主要结论如下:

1）参数分析表明,针对既有综合体上部住宅区域,钢弹簧浮置地板不同布置位置对减振效果的影响较小,上部建筑各层垂向Z振级的平均降低值仅相差0.81 dB.综合考虑减振效果与抗震性能,建议将钢弹簧浮置地板优先安装在既有综合体上部建筑首层,以在保证减振效果的同时,避免底层附加质量过大而放大结构地震响应.

2）浮置板刚度变化对减振效果的影响较为有限,浮置板不同刚度可使上部建筑各层的垂向Z振级平均减小4.59～5.28 dB.在实际工程中,考虑到既有建筑内部空间的高度限制,建议浮置板厚度控制在

100～150 mm之间，以兼顾减振性能与空间利用率.

3）通过在桁架转换层中增设弹性支撑，随着目标自振频率由3 Hz增加至5 Hz（即钢弹簧支座竖向刚度增加），减振效果呈现逐渐下降的趋势.不同目标自振频率，可使上部建筑各层垂向Z振级平均减小3.39～5.75 dB.对减振效果要求较高的情况，建议优先选取较低目标自振频率；而综合考虑减振效果与抗震性能，建议体系的目标自振频率取值范围为3～5 Hz，以有效提高人群舒适性，同时对原结构的抗震性能无明显不利影响.

4）钢弹簧浮置地板依靠附加质量与弹性隔振层实现局部减振，对原结构整体抗侧刚度影响较小；弹性支撑则通过在转换层关键节点处引入隔振元件，从而实现整体减振.

后续研究可进一步结合现场实测、模型试验和长期监测，对钢弹簧浮置地板与弹性支撑措施在实际运营条件下的减振效果进行验证，并明确数值模拟结果与工程实测响应之间的差异.同时，减隔振构件在长期列车振动、环境作用及偶发地震作用下可能出现刚度退化、阻尼变化和连接性能劣化等问题，仍需系统研究其耐久性、维护周期及性能退化规律.此外，针对既有地铁上盖综合体层高受限、施工空间不足和运营不中断等工程约束，还应进一步优化浮置地板与弹性支撑的构造形式、节点连接和施工工艺，为同类既有结构的减振改造提供更具可实施性的技术依据.

参考文献（References）：

[1] 陈宇. TOD上盖建筑振动响应的现场实测和模型试验研究[D]. 广州：广州大学，2024：30.
CHEN Yu. Field measurements and modelling tests on vibration response of TOD Building [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024:30.（in Chinese）

[2] 中华人民共和国交通运输部. 全国城市轨道交通运营里程超11710公里[EB/OL].（2026-01-29）[2026-04-28]. https://www.mot.gov.cn/xinwen/jiaotongyaowen/202601/t20260129_4199263.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. The operation mileage of urban rail transit nationwide exceeds 11, 710 km [EB/OL].（2026-01-29）[2026-04-28]. https://www.mot.gov.cn/xinwen/jiaotongyaowen/202601/t20260129_4199263.html.（in Chinese）

[3] 解琳琳，王心宇，李爱群，等. 地铁上盖层间隔震建筑设计研究[J]. 工程力学，2022，39(7)：39－48.
Xie Linlin, Wang Xinyu, Li Aiqun, et al. The design of inter-story isolated buildings built on top of metro depots[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(7): 39－48.（in Chinese）

[4] Zhi G L, Xu X, Guo T, et al. Experimental and numerical investigation of vibrations in over-track scale model buildings [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77: 107538.

[5] 范重，崔俊伟，薛浩淳，等. 地铁上盖结构隔震效果研究[J]. 工程力学，2021，38(增1)：77－88.
Fan Zhong, Cui Junwei, Xue Haochun, et al. Study on the isolation effect of subway cover structures[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(S1): 77－88.（in Chinese）

[6] 甘建雄. 带桁架转换层的框架核心筒结构抗震性能分析[D]. 南昌：南昌大学，2021：55.
Gan Jianxiong. Research on seismic performance of frame core tube structure with truss transition layer[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021:55.（in Chinese）

[7] 吉春卿. 梁式和桁架转换层部分框支剪力墙结构的抗震性能研究[D]. 太原：太原理工大学，2020：121.
Ji Chunqing. Study on seismic behavior of partial frame supported shear wall structure in beam and truss transfer story [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020:121.（in Chinese）

[8] 汪益敏，陶子渝，邹超，等. 地铁车辆段咽喉区上盖建筑振动传播规律[J]. 交通运输工程学报，2022，22(1)：112－121.
Wang Yimin, Tao Ziyu, Zou Chao, et al. Vibration propagation law within over-track buildings above throat area of metro depot[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 112－121.（in Chinese）

[9] Kowalska-koczwara A, Pachla F, Burdzik R. Research on human exposure to transport-induced vibration in buildings [J]. Applied Sciences, 2024, 14(19): 9016－9016.

[10] Erkal A. Impact of traffic-induced vibrations on residential buildings and their occupants in metropolitan cities [J]. Promet-Traffic&Transportation, 2019, 31(3): 271－285.

[11] Xia H, Wei P B, Cao Y M, et al. Traffic induced vibrations of ground environments and buildings[M]//Environmental Vibrations: Prediction, Monitoring, Mitigation and Evaluation (ISEV 2005). London: CRC Press, 2021: 529－539.

[12] 李明. 上盖建筑的地铁车站综合体结构地震响应及简化力学模型[D]. 石家庄：河北科技大学，2022：89.
Li Ming. Seismic response and simplified mechanical model of subway station complex structure covered with buildings [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2022:89.（in Chinese）

[13] Li H, Yang W G, Liu P, et al. Isolation effects of vehicle-induced vibration tested by integral floating method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(9): 16878140211044960.

[14] Zhou Y, Ma K Q, Chen P, et al. Investigations on train-induced vibration and vibration control of an over-track building using thick-layer rubber bearings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2022,

31(1): e1898.

[15] Zhang Z D, Vassiliou M F, Zhou Y. Numerical and analytical investigations on tensile behavior of thick rubber bearings[J]. Engineering Structures, 2024, 301: 117313.

[16] Lopes P, Costa P A, Ferraz M, et al. Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 61/62: 269－285.

[17] Luo W L, Liang Q H, Zhou Y, et al. A novel three-dimensional isolation bearing for buildings subject to metro- and earthquake-induced vibrations: Laboratory test and application[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 86: 108798.

[18] Zhou Y, Zhang Z D. Experimental and analytical investigations on compressive behavior of thick rubber bearings for mitigating subway-induced vibration[J]. Engineering Structures, 2022, 270: 114879.

[19] 梁发云, 陈海兵, 孙海, 等. 浅埋地铁下穿越引起既有建筑物振动治理分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增2): 271－274.
Liang Fayun, Chen Haibing, Sun Hai, et al. Analysis on vibration control of existing buildings caused by shallow subway crossing [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 271－274. (in Chinese)

[20] 屈文俊, 夏倩. 地铁环境下既有建筑结构的减隔振方法研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 8－14.
Qu Wenjun, Xia Qian. Research on mitigation methods of vibrations caused by metro environment for existing building structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1): 8－14. (in Chinese)

[21] 周智东. 带高位桁架转换层的框架核心筒结构抗震性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
Zhou Zhidong. Study on seismic performance of frame core tube structure with high truss conversion layer [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023. (in Chinese)

[22] He M W. Study on the mechanical behavior of long-span steel truss transfer storey[J]. Advanced Materials Research, 2013, 838/839/840/841: 219－226.

[23] Zhai K L, Lei J S, Li S X. The seismic performance of high-rise structure with different conversion layer position[J]. Advanced Materials Research, 2013, 671/672/673/674: 1505－1508.

[24] Liu Y L, Yan T L, Li J F, et al. Force analysis on high-rise building with a transfer story stress under seismic action [J]. Advanced Materials Research, 2011, 179/180: 398－402.

[25] Londhe R S. Shear capacity of reinforced concrete transfer beams reinforced with longitudinal steel [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 35: 190－194.

[26] 周巍, 吴永红, 屈文俊, 等. 城市轨道交通环境中既有建筑室内振动隔振方法研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(增1): 307－311.
Zhou Wei, Wu Yonghong, Qu Wenjun, et al. The research of indoor vibration isolation of existing building in the environment of urban rail transit system[J]. Industrial Construction, 2008, 38(S1): 307－311. (in Chinese)

[27] 杨维国, 邹晓光, 李昊, 等. 加厚筏板基础建筑物底板对地铁所致振动的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(3): 58－67.
Yang Weiguo, Zou Xiaoguang, Li Hao, et al. Influence of thickened base floor of raft foundation building on vibration caused by metro operation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(3): 58－67. (in Chinese)

[28] 杨维国, 李昊, 康凯, 等. 地下高铁致结构振动全过程分析及隔振支座减隔振性能研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(1): 254－264.
Yang Weiguo, Li Hao, Kang Kai, et al. Analysis of whole process of structural vibration induced by underground high-speed train and performance of vibration isolation support[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(1): 254－264. (in Chinese)

[29] Yang W G, Wang M, Shi J Q, et al. Performance study on the whole vibration process of a museum induced by metro [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2015, 55(2): 413－434.

[30] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46－51.
Liu Jingbo, Wang Zhenyu, Du Xiuli, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 46－51. (in Chinese)

[31] 李豪杰. 地铁列车荷载作用下车站一体化开发建筑振动响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022:121.
Li Haojie. Study on vibration response of metro station integrated building under metro train-induced [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022:121. (in Chinese)

[32] 丛龙. 考虑土-结构相互作用的地震反应分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2013:123.
Cong Long. Analysis of seismic response considering soil-structure interaction [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013:123. (in Chinese)

[33] 北京市市场监督管理局. 地铁噪声与振动控制规范:DB11/T 838-2019[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
Local Standard of Beijing Municipality. Code for noise and vibration control of subway: DB11/T 838-2019[S]. Beijing: Environmental Science Press of China, 2019. (in Chinese)

[34] ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements [S]. Geneva: ISO, 1997.

[35] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准:GB 10070-1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. standard of environmental vibration in urban area: GB 10070—1988[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988. (in Chinese)

[36] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准:JGJ/T 170—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for limit and measuring method of building vibration and secondary noise caused by urban rail transit: JGJ/T 170—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)

[37] 李昊, 杨维国, 邹晓光, 等. 定点锤击及现场列车作用下浮筑隔振效果对比试验及预测方法研究[J]. 工程力学, 2022, 39(11): 233－244.
Li Hao, Yang Weiguo, Zou Xiaoguang, et al. Comparative test and prediction method study on vibration isolation effect of floating slab under fixed-point hammering and on-site train[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(11): 233－244. (in Chinese)

[38] 曹志亮. 高架地铁车库-上盖物业振动舒适度与控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2018:67.
Cao Zhiliang. Serviceability analysis and vibration control of elevated metro depot and over-depot residential building complex [D]. Nanjing: Southeast University, 2018:67. (in Chinese)

[39] 王田友. 地铁运行所致环境振动与建筑物隔振方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008:88.
Wang Tianyou. Study on subway-induced environmental vibration and isolation method of building from it [D]. Shanghai: Tongji University, 2008:88. (in Chinese)

[40] 申跃奎, 丁洁民, 陆秀丽. 地铁激励下房屋的环境振动与隔振设计[J]. 建筑结构, 2010, 40(10): 78－81.
Shen Yuekui, Ding Jiemin, Lu Xiuli. Environment vibration induced by subway and vibration isolation of a building[J]. Building Structure, 2010, 40(10): 78－81. (in Chinese)

[41] 赵鹏. 钢弹簧隔振减震装置性能试验与结构振动控制设计分析研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2020:95.
Zhao Peng. Performance test and structural vibration control design of steel spring isolator [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2020: 95. (in Chinese)

[42] 唐兴荣. 高层建筑转换层结构设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 72－89.
Tang Xingrong. High-rise Building conversion layer structure design and construction [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2002: 72－89. (in Chinese)

[43] 中国工程建设标准化协会标准. 城市轨道交通上盖结构设计标准:T/CECS 1035-2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
Standard of the China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for structural design of urban over-track buildings: T/CECS 1035-2022[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2022. (in Chinese)

[44] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408-2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design Standards for Seismic Isolation of Buildings: GB/T 51408—2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)

[45] 中国工程建设标准化协会标准. 建筑工程振震双控技术标准:T/CECS 1234-2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
Technical standard for integrated control of engineering vibration and seismic vibration of building engineering: T/CECS 1234—2023[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2023. (in Chinese)

[46] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计标准: GB/T 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB/T 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[47] 智国梁, 郭彤, 刘中祥, 等. 地铁上盖物业车致振动特性与减振措施研究[J]. 工程力学, 2026, 43(1): 74－84.
Zhi Guoliang, Guo Tong, LIU Zhongxiang, et al. Study on train-induced vibration characteristics and mitigation measures of over-track buildings[J]. Engineering Mechanics, 2026, 43(1): 74－84. (in Chinese)

[48] 兰凯, 黄博. 钢弹簧隔振支座在地铁上盖建筑中的应用[J]. 四川建筑, 2022, 42(增1): 106－109.
Lan Kai, Huang Bo. Application of steel spring vibration isolation bearing in subway superstructure [J]. Sichuan Architecture, 2022, 42(S1): 106－109. (in Chinese)

[49] 王春光, 焦伟杰, 刘卫宗. 钢弹簧减振支座对结构抗震性能的影响研究[C]// 2024年工程结构抗震技术交流会论文集(第一册)会议. 昆明: 科学出版社, 2024: 336－342.
Wang Chunguang, Jiao Weijie, Liu Weizong. Research on the influence of steel spring vibration reduction bearings on the seismic performance of structures [C]// Proceedings of the 2024 Seismic structures technology symposium (First Book). Kunming: Science Press, 2024: 336－342. (in Chinese)