

地铁场站咽喉区上盖结构列车致振响应研究

黄建华^{1,2}, 吴保林^{1,2}

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 以福州滨海软土区某地铁场站及其上盖结构为工程依托, 通过现场测试与数值模拟分析了咽喉区列车振动波在上盖五层结构内的传播规律。研究表明: 上盖结构房间楼板振动沿楼层向上呈现先衰减后放大的趋势, 且各层振动卓越频带为 40~80 Hz, 其中首层峰值频率为 63 Hz, 三层与五层均为 50 Hz; 各层房间柱振动均大于楼梯间柱, 且房间柱振动沿楼层向上呈现先衰减后放大的趋势, 楼梯间柱振动在各楼层内则基本保持不变; 首层与五层房间楼板竖向分频最大振级 VL_{zmax} 分别超限 15.2 dB 与 3.2 dB, 各层房间柱与楼梯间柱 VL_{zmax} 均未超限; 柱截面尺寸增大至 0.5 m×0.5 m 时, 上部楼层房间楼板 VL_{zmax} 可降低 2.2~5.1 dB, 楼板厚度增大至 0.2 m 时, 下部楼层 VL_{zmax} 可降低 1.4~2 dB。本研究成果可为地铁场站及其上盖结构列车致振响应研究与优化设计提供理论借鉴。

关键词: 地铁场站; 现场测试; 数值模拟; 上盖结构; 咽喉区

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)04-0316-07

Study of train vibration response of superstructure in throat area of metro station

HUANG Jianhua^{1,2}, WU Baolin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underground Engineering for Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on a subway station and its superstructure in the coastal soft soil area of Fuzhou, the propagation of train vibration waves in the five-story superstructure in the throat area was analyzed through field tests and numerical simulations. The study shows that: the vibration of the floor slab of the superstructure room shows the trend of attenuation and then amplification along the floor, and the vibration excellence frequency band of each floor is 40 Hz~80 Hz, in which the peak frequency of the first floor is 63 Hz, and that of the third and fifth floors is both 50 Hz; the vibration of the room columns of each floor is greater than that of the stairwell columns, and the vibration of the room columns shows the trend of attenuation and then amplification along the floor, and the vibration of the stairwell columns is basically unchanged in all the floors; VL_{zmax} of vertical crossover frequency of the floor slab of the first floor and the fifth floor exceeds the limit by 15.2 dB and 3.2 dB, respectively, and the VL_{zmax} of the room column and the stairwell column of each floor does not exceed the limit; VL_{zmax} of the upper floors can be reduced by 2.2 dB~5.1 dB when the column cross-sectional size is increased to 0.5 m×0.5 m, and VL_{zmax} can be reduced by 1.4 dB~2 dB when the floor thickness is increased to 0.2 m. Results of this research can provide theoretical reference for the research and optimal design of train vibration response of subway stations and their superstructures.

Keywords: metro station; field test; numerical simulation; superstructure; throat area

地铁场站内线路复杂、存在较多道岔及曲线轨道, 列车振源多样且集中, 列车运行时引起的振

动波通过盖板平台柱传递至上盖结构, 会影响上盖建筑居民的身心健康。关于地铁上盖结构列车

收稿日期: 2024-09-28

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2021J011064)

第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 地铁与上盖结构。

致振响应问题,国内外学者进行了大量研究。冯青松等^[1]通过现场测试,分析了某双层地铁车辆段运用库内车致上盖结构振动的传播规律。谢伟平等^[2]通过现场测试分析了某车辆段内试车线不同列车速度条件下上盖结构的振动响应。智国梁等^[3]通过数值模拟与现场测试相结合,分析了某高架式地铁车辆段上盖结构自身特性对列车致振响应的影响。冯青松等^[4]在数值模拟中采用一致激励法,分析了检修线与试车线双振源激励下的地铁车辆段地面振动传播规律。Kuo K A 等^[5]通过现场测试与数值模拟,分析了某地铁车辆段列车振动在上盖结构内的传递损失。汪益敏等^[6]通过对广州萝岗车辆段直线电机列车引起上盖结构振动的现场测试,分析了列车致振在同一楼层内的水平传播规律。Yanming C^[7]等分析了某下沉式地铁车辆段地下一层与地下二层行车时上盖结构的振动特性。

综上,现有研究主要围绕地铁车辆段上盖结构列车致振开展,关于地铁场站上盖结构致振响应研究鲜有报道,本文以福州某地铁场站咽喉区及其上盖结构为工程依托,基于现场测试与数值模拟分析咽喉区上盖结构的振动响应。

1 工程概况

工程位于福州地铁 2 号线竹岐地铁场站及其上盖结构。依据现场地勘资料,所属区域为冲淤积平原地貌,覆盖层以第四系海积、海陆交互、冲洪积土层为主,其下伏燕山晚期花岗岩,场地土壤类型定义为软土-中软土。该场站盖上部分主要用于物业开发,建筑总面积为 96 684.39 m²,盖下部分主要包括库房及咽喉等有轨道敷设的区域,盖板平台由 8.8 m 高的混凝土立柱支撑,平台柱下基础形式为钻孔灌注桩,持力层为粗中砂。图 1 为地铁场站及其上盖结构平面布置图。

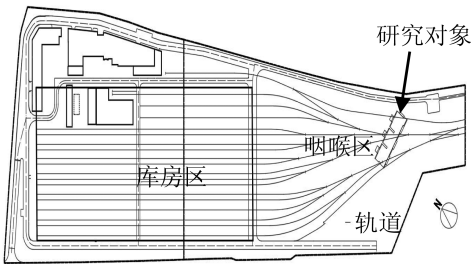


图 1 地铁场站及其上盖结构平面布置图

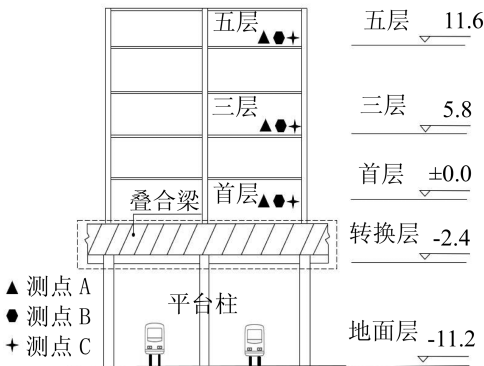
Fig.1 Layout of metro station and its superstructure

2 测试方案

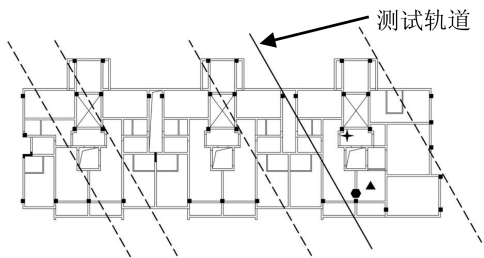
2.1 测试内容及测试仪器

选取场站咽喉区上盖一幢 5 层框架结构住宅建筑,层高 2.9 m,东西向长 45 m、南北向长 16 m,盖板平台柱与上盖结构采用叠合梁式转换层连接,转换层与盖板整体厚度为 2.4 m,盖下共有 5 条轨道经过。

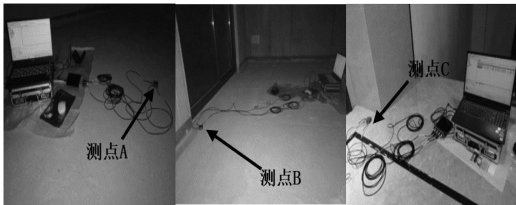
上盖结构测点布置如图 2 所示。由于列车运行在不同轨道线路时对上盖结构产生的振动离散性较小,因此本文仅分析同一轨道线路下列车致上盖结构的振动响应,如图 2(a) 所示;此外,为研究上盖结构列车致振沿楼层方向与水平方向的传播规律,在一、三、五层各布置 3 个测点,并以编号 A、B、C 分别表示房间楼板、房间柱与楼梯间柱测点,如图 2(b)、图 2(c) 所示。



(a) 测点布置立面图 (单位: m)



(b) 测试轨道及测点布置平面图



(c) 测点布置实景图

图 2 上盖结构测点布置图

Fig.2 Layout of superstructure measurement points

采用 YND9Y42 型 IEPE 加速度传感器采集

各测点的竖向振动信号,利用 DASP 数据分析软件对信号预处理,设置采样频率 1 000 Hz,分析频率 200 Hz。为避免环境振动干扰,选择列车收车时段(22:30—00:30)持续采集各测点的振动信号。现场测试时,场站咽喉区运行车辆为 B 型空载列车,6 节编组,车长 119.8 m,列车运行速度在 17.8~22.5 km/h,轨道采取无缝钢轨、预应力混凝土轨枕与碎石道床。

2.2 数据处理

利用 MATLAB 将采集获取的振动信号消除趋势项后,得到加速度时程结果,利用快速傅里叶变换得到加速度频谱结果,依据《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》^[8],求解出各测点的竖向分频振级 VL_z 。

$$VL_z = 20\lg\left(\frac{a_{rms}}{a_0}\right)$$

(1)

式中, a_{rms} 为加速度参考值, m/s^2 ; a_0 为加速度基准值,取 $1\times10^{-6} m/s^2$ 。

以各车次经过时竖向分频最大振级 VL_{zmax} 为评价指标,其标准限值如表 1 所示,上盖结构属于居民与商业混合建筑,人员流动频繁且停留时间长,对振动耐受度较低,因此以 67 dB 作为振动评价限值。

表 1 分频最大振级 VL_{zmax} 标准限值

Tab.1 Standard limits of crossover frequency maximum vibration level VL_{zmax}

单位: dB		
适用区域	昼间	夜间
特殊住宅区	65	62
居民、文教区	65	62
混合区、商业区	70	67
工业集中区	75	72
交通干线两侧	75	72

3 测试结果分析

3.1 楼板振动响应分析

分析上盖结构房间楼板(测点 A)竖向振动沿楼层方向的传播规律,选择一组加速度随时间变化的典型振动曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,列车经过时,各层楼板时域波形持续时间为 50 s。峰值加速度集中在 $0.033\sim0.065 m/s^2$ 内,其中首

层峰值加速度最大,为 $0.065 m/s^2$,分析其原因可能是由于首层楼板与叠合梁式转换层连接,增大了其自身刚度,导致列车产生的振动能量被首层充分吸收;同时列车运行时产生的中高频振动波沿平台柱向上盖结构首层楼板传播过程中,由于波长较短未经过有效衰减导致首层响应较大。振动加速度沿楼层方向呈现先衰减后放大的趋势,分析其原因可能由列车振源入射波沿楼层向上传播时与顶层反射波叠加所导致,因此振动波沿楼层向上传播时并非呈单调衰减趋势。

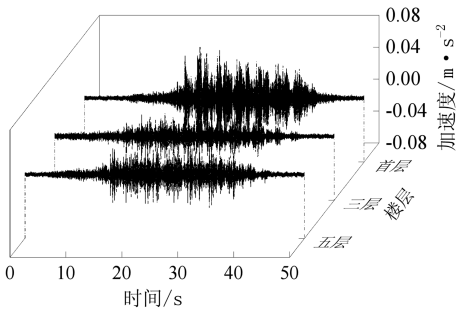


图 3 测点 A 竖向振动时程曲线

Fig.3 Vertical vibration time-history curve of measurement point A

图 4(a)和图 4(b)分别为房间楼板(测点 A)对应的竖向振动频谱曲线与分频振级曲线。

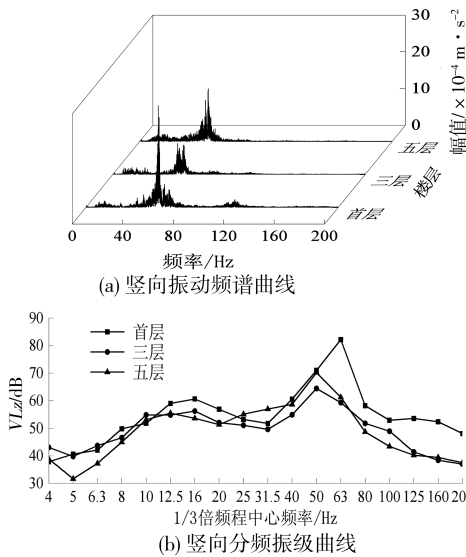


图 4 测点 A 竖向振动频域曲线

Fig.4 Frequency domain curve of vertical vibration at measurement point A

分析可知,各楼层内竖向振动卓越频带均为 40~80 Hz,该频带主要取决于列车荷载振源特性以及楼板自身动力特性,其中首层峰值频率为

63 Hz,三层与五层均为 50 Hz,分析其原因可能是由于首层楼板与平台盖板采用叠合梁式转换结构连接增大了其固有频率,导致其与列车振源荷载峰值频率产生共振所引起。此外,各层房间楼板竖向分频振级为 31.7~82.2 dB,楼层 VL_{zmax} 分别为首层 82.2 dB、三层 64.4 dB、五层 70.2 dB。可见,除三层外,其余楼层均不满足振动舒适度要求,首层与五层分别超限 15.2 dB 与 3.2 dB。

3.2 结构柱振动响应分析

对比分析上盖结构房间柱(测点 B)与楼梯间柱(测点 C)竖向振动沿楼层方向与水平方向的传播规律,图 5 为其对应的一组典型振动加速度时程曲线。

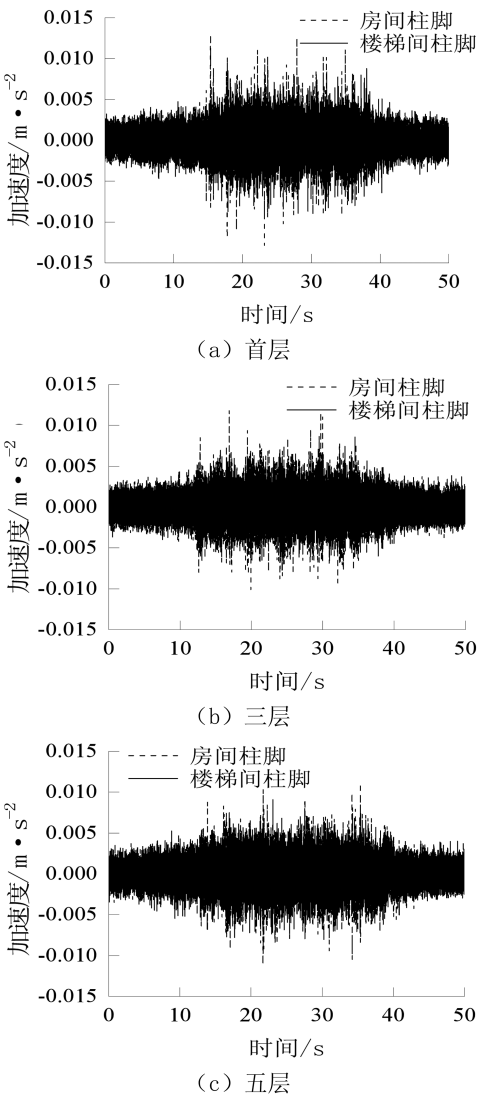


图 5 测点 B、C 竖向振动时程曲线

Fig.5 Vertical vibration time-history curves of measuring points B and C

由图 5 可知,同一楼层内,房间柱振动峰值加速度大于楼梯间柱,分析其原因可能是由于楼梯间柱需要承受楼梯静载与活荷载,设计刚度相对较大使其振动小于房间柱。此外,房间柱的振动加速度沿楼层方向呈现逐渐衰减的趋势,其振动峰值加速度集中在 $0.011\sim0.013\text{ m/s}^2$ 内,分析其原因可能是由于房间柱与梁板构件相连,列车振动以轴向波的形式沿结构柱向上传播至各层房间柱节点时,引发梁板弯曲振动从而耗散轴向振动波,导致房间柱振动沿楼层方向传播时呈现逐渐衰减趋势。楼梯间柱振动加速度沿楼层方向整体变化不明显,各楼层内均保持在 0.01 m/s^2 左右,分析其原因可能是由于与楼梯间柱相连的梁板构件相对较少,对轴向振动波的能量耗散不明显所引起。

图 6 和图 7 分别为房间柱(测点 B)与楼梯间柱(测点 C)对应的竖向振动频谱曲线与分频振级曲线。

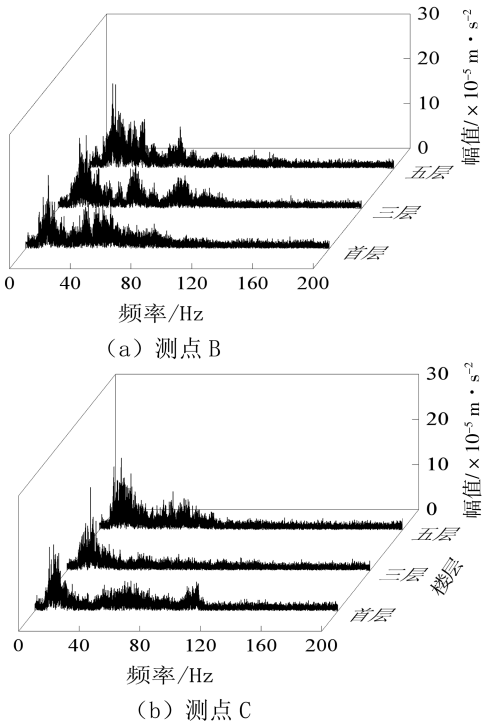


图 6 测点 B、C 竖向振动频谱曲线

Fig.6 Vertical vibration spectrum curves of measurement points B and C

由图可知:各楼层房间柱竖向振动卓越频带为 10~60 Hz,楼梯间柱竖向振动卓越频带为 10~40 Hz,分析其原因可能是由于房间内存在隔墙等非结构构件,改变了房间的整体振动特性,使列车

振源入射波在房间内产生更多的反射、散射与干涉现象,从而导致房间柱振动卓越频带更丰富。此外,各层房间柱与楼梯间柱的竖向分频振级大小分别为 33.5~63.8 dB 与 32.1~59.3 dB。可见,各楼层结构柱 VL_{zmax} 均未超过振动限值,满足振动舒适度要求。

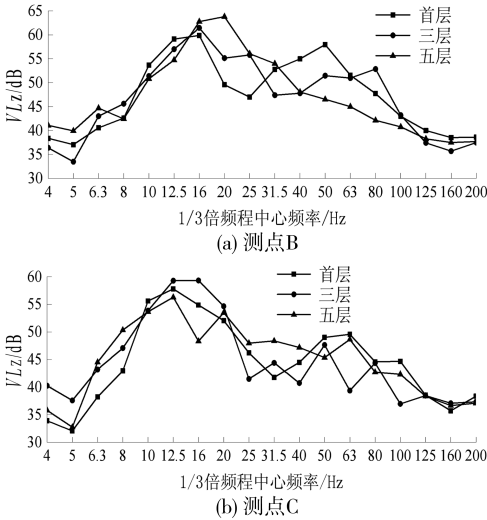


图 7 测点 B、C 竖向分频振级曲线

Fig.7 Vertical crossover frequency magnitude curves of measurement points B and C

4 列车致振三维数值模拟

4.1 模型建立

依据现场地勘报告与结构自身状况,利用有限元软件 MIDAS GTS NX 建立土体-上盖结构三维数值模型,如图 8 所示。其中,梁、柱均采用 beam188 单元模拟,平台盖板与楼板采用 shell181 单元模拟,这两种单元均考虑了剪切变形的影响,盖板平台柱与结构柱截面尺寸分别为 1 m×1 m 与 0.4 m×0.4 m,转换叠合梁与结构梁截面尺寸分别为 1.2 m×1 m 与 0.3 m×0.2 m,盖板与楼板厚度分别为 1.2 m 与 0.15 m。土体采用 solid185 单元模拟,模型土层基本参数如表 2 所示。

由于地铁运行时对土体与上盖结构产生的振动响应较小,因此土体与结构均定义为线弹性材料。为防止动力分析时振动波在土体边界发生反射影响计算结果,将土体四周设置为黏性人工边界,并对各边界单元节点处 X 、 Y 、 Z 三个方向施加相应的弹簧。即依据土层力学参数计算出各边界单元节点处 X 、 Y 、 Z 三个方向上的阻尼值,其计算公式如下:

$$\begin{cases} C_p = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \gamma A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\gamma g}} = c_p A \\ C_s = \rho A \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \gamma A \sqrt{\frac{G}{\gamma g}} = c_s A \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_p 为整体区域上 P 波阻尼系数; C_s 为整体区域上 S 波阻尼系数; ρ 为土层密度, kg/m^3 ; λ 为土层体积模量, MPa ; G 为土层剪切模量, MPa ; A 为弹簧节点所在位置的有效面积, m^2 ; γ 为土层容重, N/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; c_p 为单位面积上 P 波阻尼系数; c_s 为单位面积上 S 波阻尼系数。

将计算得到的 C_p 作为节点弹簧所在位置的法向参数, C_s 作为节点弹簧所在位置的切向参数,最终可求解出任意边界节点处 X 、 Y 、 Z 三个方向所对应的阻尼值 C_X 、 C_Y 、 C_Z 。同时将土体底部设置为固定约束以模拟无限地基。

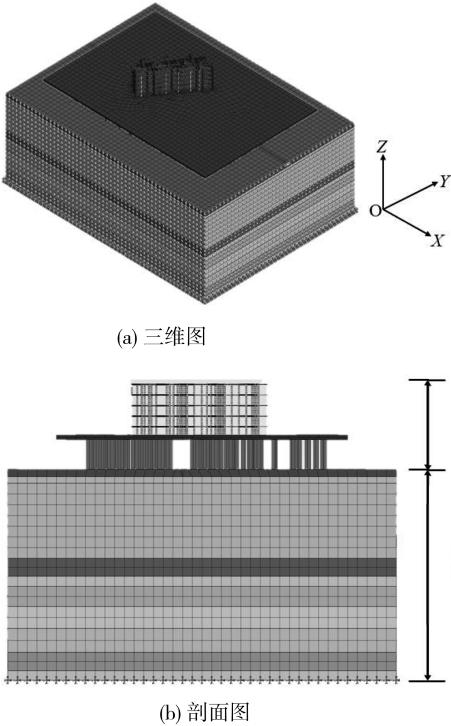


图 8 土体-上盖结构三维数值模型(单位:m)
Fig.8 Three-dimensional numerical modelling of soil-superstructure (unit: m)

表 2 土层参数
Tab.2 Soil parameters

类别	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量/ MPa	泊松 比 μ
①杂填土	1 750	12.5	0.30
②粉质黏土	1 910	16.8	0.30

续表

类别	密度/ kg · m ⁻³	弹性模量/ MPa	泊松 比μ
③粗中砂	1 950	42.6	0.30
④淤泥夹砂	1 580	7.2	0.30
⑤圆砾	2 050	60.0	0.26
⑥淤泥夹砂	1 620	7.1	0.30
⑦卵石	2 100	85.0	0.21
⑧砂土状强风化花岗岩	2 050	100.0	0.26
⑨碎块状强风化花岗岩	2 150	210.0	0.24
⑩中风化花岗岩	2 300	400.0	0.25

由于地铁运行时对上盖结构产生振动的主频范围在 4~200 Hz 内,土体范围取 160 m (X)×120 m (Y)×57.8 m (Z)可满足模型最小尺寸要求^[9]。将靠近振源与拾振点位置网格尺寸控制在 0.5 m 内,同时为节省计算成本,将其余部位网格尺寸控制在 2 m 以内。

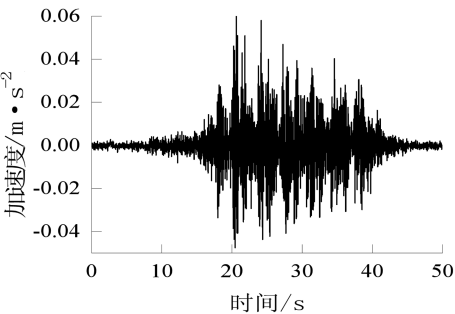
4.2 荷载输入与模型验证

将首层楼梯间柱(测点 C)测试竖向振动加速度作为模型的荷载输入,并以首层房间楼板(测点 A)作为参考点,将其模拟值与测试值进行比对以验证模型的合理性。本文研究的地铁场站上盖结构垂直于地铁运行方向距离较小,因此采用不考虑振动波的输入时差与行波效应影响的一致激励法进行荷载输入。

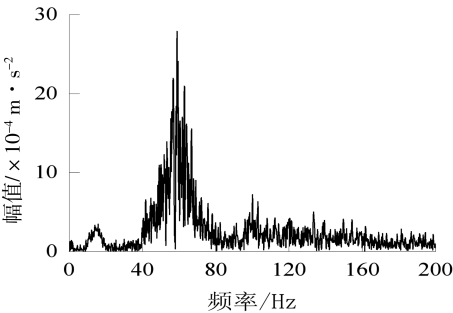
基于 MIDAS GTS NX 软件完成模型求解,采用 Newmark-β 直接积分法,积分时间步长取 0.005 s。采用 Rayleigh 阻尼,以低频 4 Hz 与楼板测试峰值频率 63 Hz 计算出阻尼系数 α 为 1.417,β 为 1.407×10⁻³,系统阻尼比取 0.03。图 9 为模型计算结果,表 3 为测试与计算值对比结果。由图 9、表 3 可知,模型计算结果与测试结果整体吻合度较好,其中,两者峰值加速度与 VL_{zmax} 相对误差均在 5% 以内,表明所建立的数值模型合理,可进一步用于后续上盖结构列车致振参数化分析研究。

表 3 实测与计算对比结果

类别	峰值加速度 /m · s ⁻²	VL _{zmax} /dB
实测值	0.065	82.2
计算值	0.063	80.9
误差/%	3.08	1.58



(a) 竖向振动加速度时程曲线



(b) 竖向振动频谱曲线

图 9 模型计算结果

Fig.9 Model calculation results

4.3 上盖结构列车致振参数分析

由于地铁运行时,上盖结构受车致振属于弱振响应,对结构自身构件的参数变化较为敏感。基于 4.1 节所建立的有限元模型,通过改变上盖结构柱截面尺寸与楼板厚度并以各层响应最明显的房间楼板(测点 A)为拾振点,分析车致上盖结构的振动传播规律。

4.3.1 结构柱截面尺寸致振影响

结构柱截面尺寸的大小会改变其自身与楼板的波阻抗比,进而影响列车振动波在上盖结构内的传播。选取截面尺寸为 0.5 m×0.5 m 与 0.6 m×0.6 m 的结构柱类型,与原始柱截面尺寸作用下的振动响应进行对比分析。

房间楼板(测点 A)在不同柱截面尺寸作用下的 VL_{zmax} 值如图 10 所示。由图 10 可知,当柱截面尺寸增大至 0.5 m×0.5 m 时,上部楼层的衰减速度高于下部楼层,其中,上部楼层 VL_{zmax} 可降低 2.2~5.1 dB,下部楼层 VL_{zmax} 可降低 0.1~0.2 dB,分析其原因可能是由于振动波向上部楼层传播时经过更多的结构构件后能量得到充分耗散,且增大柱截面尺寸后会放大上盖结构的整体刚度,使振动波向上部楼层传播时受到更大的阻力所引

起。此外,当柱截面尺寸由 0.5 m×0.5 m 增大至 0.6 m×0.6 m 时,上盖结构振动响应衰减效果整体趋于饱和,其中,下部楼层的衰减速度高于上部楼层,下部楼层 VL_{zmax} 可降低 0.8~1.6 dB,上部楼层 VL_{zmax} 可降低 0.5~0.6 dB,分析其原因可能是由于下部楼层所需承受的荷载更大,整体性与稳定性更高,当柱截面尺寸增大至一定程度后,可提高下部楼层的承载力与抗变形能力,使下部楼层的振动衰减效果更明显。

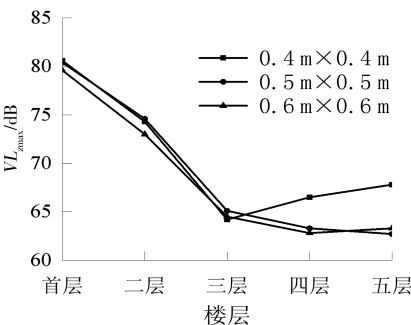


图 10 结构柱截面尺寸致振影响曲线
Fig.10 Vibration effect curve of structural column cross-section size

4.3.2 楼板厚度致振影响

增大楼板厚度会改变其自身动力特性,进而影响外部列车荷载对其产生的振动响应。选取板厚为 0.2 m 与 0.3 m 的楼板类型,与原始板厚作用下的振动响应对比分析。

房间楼板(测点 A)在不同楼板厚度作用下的 VL_{zmax} 值如图 11 所示。由图 11 可知,当板厚由 0.15 m 增大至 0.2 m 时,下部楼层的衰减速度高于上部楼层,下部楼层 VL_{zmax} 可降低 1.4~2 dB,上部楼层除五层外,四层楼板 VL_{zmax} 可降低 0.9 dB,分析其原因可能是由于板厚增大后,下部楼层的质量与刚度得到提升,能有效吸收与耗散振动能量,从而导致下部楼层的振动衰减效果更明显;同时由于顶部楼层质量相对较低,惯性力相对较小,

使顶层在受到列车激励时会出现“鞭梢效应”,使振动能量在顶层出现相对集中现象,从而放大顶部楼层的振动响应。此外,板厚增大后,中部楼层的衰减效果最为显著,分析原因可能是厚度增加后的楼板相当于在中部楼层设置了额外的“减振层”,有效吸收振动能量并抑制振动波向上部楼层传播。

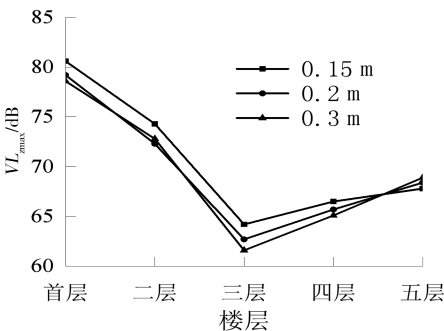


图 11 楼板厚度致振影响曲线
Fig.11 Vibration effect curve of floor thickness

5 结论

1) 房间楼板振动沿楼层向上呈现先衰减后放大的趋势,且各层振动卓越频带为 40~80 Hz,其中首层峰值频率为 63 Hz,三层与五层均为 50 Hz。

2) 各层房间柱振动均大于楼梯间柱,且房间柱振动沿楼层向上呈现先衰减后放大的趋势,楼梯间柱振动在各楼层内则基本保持不变。

3) 上盖结构首层与五层房间楼板竖向分频最大振级 VL_{zmax} 分别超限 15.2 dB 与 3.2 dB,各层房间柱与楼梯间柱 VL_{zmax} 均未超限,建议优先以楼板作为上盖结构的振动评价点。

4) 柱截面尺寸增大至 0.5 m×0.5 m 时,上部楼层房间楼板 VL_{zmax} 可降低 2.2~5.1 dB,楼板厚度增大至 0.2 m 时,下部楼层 VL_{zmax} 可降低 1.4~2 dB。

参考文献:

[1] 冯青松,余超,唐柏赞,等. 双层车辆段上盖建筑振动与结构噪声预测分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 304-311, 321.
[2] 谢伟平,袁葵,孙亮明. 地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(3): 99-107.
[3] 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/OL]. 工程力学(2024-03-22) [2024-12-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240321.1457.006>.

cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20240805.1411.002.html.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2024.

[10] 刘志. RPC 预制管混凝土组合柱抗震性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.

[11] 罗校炳. RPC 预制管混凝土组合短柱轴压性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.

[12] 彭振. 高强箍筋增强 UHPC 管约束混凝土组合柱轴压性能研究[D]. 南京:东南大学,2021.

[13] 颜建煌. UHPC 预制管混凝土组合柱极限承载力研究[D]. 福州:福建工程学院,2022.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[15] 艾毓玮. RUHPC 及其复合构件承载性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

[16] MANDER J B,PRIESTLEY M J N,PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1988,114(8):1804-1826.

[17] LAM L,TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete[J]. Construction and Building Materials,2003,17(6/7):471-489.

(责任编辑:方素华)

(上接第 322 页)

[4] 冯青松,王子玉,刘全民,等. 双振源激励下地铁车辆段上盖建筑物振动特性[J]. 交通运输工程学报,2019,19(4):59-69.

[5] KUO K A,PAPADOPOULOS M,LOMBAERT G,et al. The coupling loss of a building subject to railway induced vibrations: numerical modelling and experimental measurements[J]. Journal of Sound and Vibration,2019,442:459-481.

[6] 汪益敏,刘品言,陶子渝,等. 地铁车辆段直线电机列车车致振动的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(9):2436-2443.

[7] CHEN Y M,FENG Q S,LIU Q J,et al. Experimental study on the characteristics of train-induced vibration in a new structure of metro depot[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2021,28(30):41407-41422.

[8] 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.

[9] 赵彦辉. 地铁车辆段列车振动对邻近建筑物影响及隔振措施研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

(责任编辑:陈雯)