

城市轨道交通上盖不同类型结构振动特性对比*

周颖¹, 张增德¹, 张君秋¹, 汪凯²

(1. 同济大学土木工程学院 上海, 200092)

(2. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院 上海, 200235)

摘要 为了研究城市轨道交通上盖不同结构类型建筑的振动特性, 以上海市徐泾车辆段上盖钢框架结构和钢筋混凝土(reinforced-concrete, 简称 RC) 框架结构为研究对象, 进行了轨道车致激励下不同结构类型振动测试, 并采用 Z 振级、1/3 倍频程和均方根加速度总量等对比振动响应。结果表明: 两类结构底部楼层的振动响应基本接近, 而盖上钢结构中上部楼层的车致振动响应较盖上钢筋混凝土结构大; 钢筋混凝土结构的上部结构存在竖向高频成分(100~180 Hz)的振动; 各楼层振动响应满足规范要求, 针对盖上钢结构, 后续设计可适当提高中上部楼层板的厚度, 以提高楼层舒适度。该研究为城市轨道交通上盖不同结构类型的建筑开发提供数据支撑。

关键词 城市轨道交通上盖建筑; 结构类型; 现场测试; 振动特性; 振动评价

中图分类号 TU375; TU391; U211; TH825

引言

为充分提高土地资源利用率, 近年来各大城市开始利用城市轨道交通站场土地资源进行上盖物业开发。城市轨道交通上盖建筑作为一种以公共交通为导向的开发模式, 因其建筑理念优异, 结构体系新颖, 兴建于中国、日本和新加坡等国家^[1-4]。然而, 由于盖下结构车辆段地铁停车列检、车辆检修、洗车喷漆和车辆试车等, 列车和轨道的相互作用将引起上盖建筑物的振动, 并产生二次噪音, 影响盖上建筑物内工作办公和居民生活质量, 这已成为城市轨道交通上盖物业开发的密切关注点^[5]。

针对上盖建筑物内车致振动问题, 国内外学者开展了一系列研究^[2, 5-13]。对于停车列检库列车引起的振动, 马开强等^[2]研究了某一低层钢筋混凝土框架结构竖向振动特性和传播规律, 建议采用 Z 振级评价。对于咽喉区列车引起的振动, 文献[7-8, 11]对高层钢筋混凝土剪力墙住宅进行了振动测试, 发现上盖平台板以上的振动放大现象, 且高层结构振动放大现象显著。对于试车线列车引起的振动, 孙亮明等^[12]对某一钢筋混凝土框架-剪力墙结构住宅进行测试, 发现总体上振动响应随车速增加而增大。针对盖下区域振动, 冯青松等^[13]对比了盖下不同区域列车运行的振动特性和地面振动衰减规律, 发现试车线附近振源强度最大, 且振源 5 m 内超限

值, 而咽喉区振动次之。陈艳明等^[14]测试了下沉式盖下列检库振动特性和传播规律。上述研究多为针对盖上钢筋混凝土结构的振动特性, 而对盖上钢结构的现场振动测试较少。

根据振动传递率随频率比变化曲线可知, 当传递率大于 1 时, 结构阻尼比越小, 振动传递率越大, 即振动响应越大。与混凝土结构相比, 钢结构在计算振动舒适度时阻尼比一般小于混凝土结构阻尼比^[15]。因此, 理论上认为相同振动激励下上盖固接钢结构的振动响应大于上盖固接钢筋混凝土结构; 然而, 目前尚未有学者开展相同振源激励下两类结构振动特性的对比分析。

笔者针对上海市徐泾车辆段上盖钢框架结构和钢筋混凝土框架结构开展振动测试, 两类结构位于咽喉区和列检库上部, 针对不同轨道列车入库振动激励, 进行盖上不同结构内部振动对比分析和评价, 研究不同类型结构的测点振动频谱特性和传播规律, 为城市轨道交通上盖物业采用不同结构类型的建筑开发提供数据支撑。

1 工程概况

上海市徐泾车辆段按功能主要分为咽喉区、列检库、检修库和试车线等区域。咽喉区是连接车辆段其他区域的地段, 轨道接头多, 直接影响整个车辆

* 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(52025083); 上海市社会发展科技攻关资助项目(21DZ1203403)
收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2022-12-08

段列车运行。列检库为徐泾车辆段主要停车区,昼夜间列车出入频繁。本次振动测试区域聚焦于咽喉区和列检库区及正上方建筑(01~06地块)。徐泾车辆段上盖建筑平面规划如图1所示。

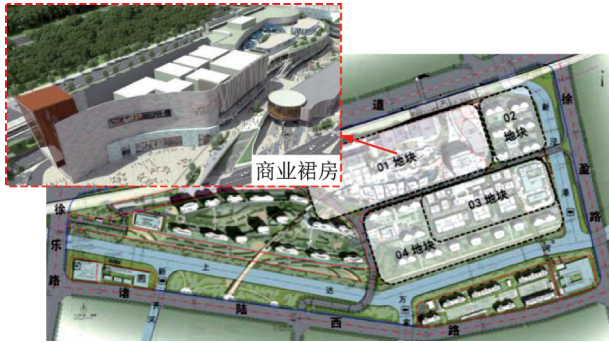


图1 徐泾车辆段上盖建筑平面规划图

Fig.1 Floor plan of over-track buildings in Xujing depot

该地块盖下包括地面层和地下层。地面层为地铁列检库,层高约为9 m。地下层为商业停车和机房等,盖下为商业裙房和办公塔楼。以3层(局部4层)的商业裙房为研究对象,层高为5~6 m。商业裙房有永久缝,分为3个裙房单体,其中:咽喉区的裙房单体采用钢框架结构,盖下结构柱网尺寸为8.0 m×12.8 m;位于列检库区的裙房单体采用钢筋混凝土框架结构,盖下结构柱网尺寸为9.0 m×12.8 m。

2 测试方案与工况

2.1 测试仪器

本次振动测试所用传感器为无线三向传感器,仪器为三轴表面封装,内部集成3个力平衡加速度计模块和存储模块,采集 x, y 和 z 三向振动数据。数字处理器使用高速硬件连接系统与主处理器进行通信,采样数据的时间同步精度可达到亚微秒级。图2为现场仪器安装示意图,采样频率为500 Hz。



图2 现场仪器安装示意图

Fig.2 On-site instrument installation

2.2 测试工况

本次振动测试主要目的是对比钢筋混凝土框架

结构和钢框架结构在列车振动激励下的响应。图3为测点平面布置示意图。选取永久缝旁靠近咽喉区的不同结构测点,分别截取盖下结构 $F_1 \sim F_3$ 和 F_4 测点具体位置以及所在楼板尺寸,测点尽量靠近所在楼板中心。

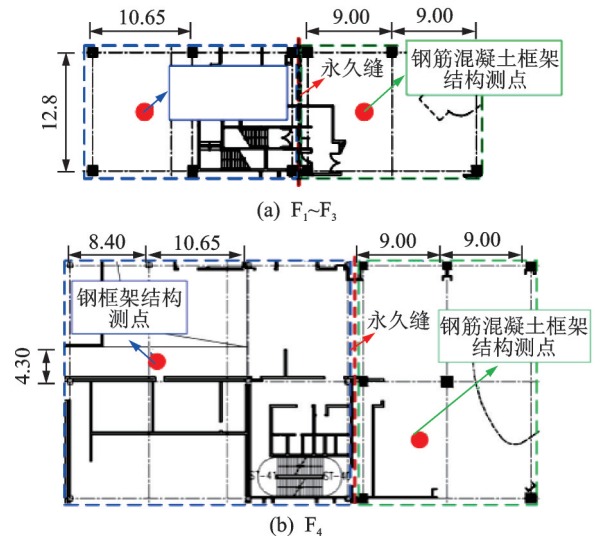


图3 测点平面布置示意图(单位:m)

Fig.3 Layout of measuring points(unit:m)

本次测试分为A,B工况,由于无线传感器数量限制,每个工况包含7个测点。图4,5分别为工况

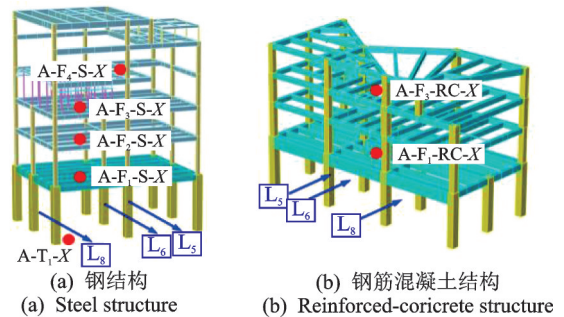


图4 工况A测点纵向布置示意图

Fig.4 Longitudinal layout of measuring points in condition A

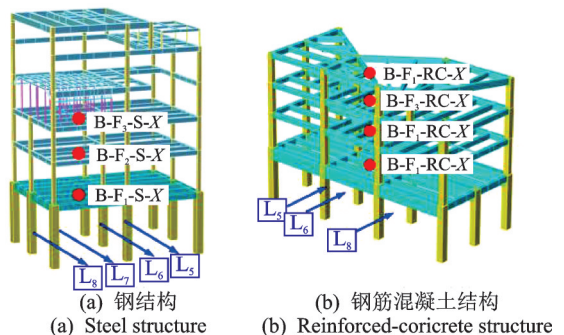


图5 工况B测点纵向布置示意图

Fig.5 Longitudinal layout of measuring points in condition B

A, B的测点纵向布置示意图,图中结构模型只截取了部分跨。测点命名原则为:A,B代表测试工况; F_2 代表所在楼层数; T_1 为轨道层;RC为钢筋混凝土框架结构;S为钢框架结构;X代表第X个轨道激励下的响应。例如:A- F_2 -RC-4表示A工况钢筋混凝土框架结构第2层在轨道 L_4 激励下的响应。

表1为各工况包含的轨道激励编号,对应于测点编号中的X。其中:A工况下有5个振动激励,分别在 L_2, L_4, L_8A 和 L_8B (2个列车入库同一轨道), L_{10} ;B工况有2个振动激励,分别为 L_5 和 L_6 。回库车速约为15 km/h。

表1 各工况包含的轨道激励编号

Tab.1 Excitations of track number included in each condition

测试工况	回库轨道号	测试工况	回库轨道号
A	L_2	B	L_5
	L_4		L_6
	L_8A		—
	L_8B		—
	L_{10}		—

3 评价指标

3.1 Z振级评价

文献[16]给出以铅垂向Z振级作为振动强度的评价指标,Z振级计算时间积分常数为1 s,计算公式为

$$a_{wz} = \left[\sum (W_i a_{fi})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$VL_z = 20 \log(a_{wz}/a_0) \quad (2)$$

其中: a_{wz} 为z方向频率计权均方根加速度; a_{fi} 为第i个1/3倍频程带的均方根加速度; W_i 为第i个1/3倍频程带的计权因数,采用W计权; VL_z 为铅垂向Z振级,单位为dB; a_0 为基准加速度,取 10^{-6} m/s^2 。

根据文献[16],本次测试区域属于“混合区、商业中心区”,列车回库为夜间,Z振级限值为72 dB。本次计算采用 W_k 计权,根据大量实测数据,比文献[16]的W计算限值提高3 dB^[17-18]。因此,Z振级限值采用文献[18]给出的夜间限值75 dB。

3.2 1/3倍频程分频带振级评价

文献[17]给出1/3倍频程分频带振级作为振动强度评价指标的评价方法,时间积分常数为1 s,以中心频率1~80 Hz的1/3倍频程铅垂向振动加速度

级最大值作为振动强度的评价指标,计算公式为

$$a_{fi} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_i^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$VAL_{z,fi} = 20 \log(a_{fi}/a_0) \quad (4)$$

$$VAL_{z,max,fi} = \max(VAL_{z,fi}) \quad (5)$$

其中: $a_i(t)$ 为第i个1/3倍频程带对应的时程;T为时间积分常数,取1 s; a_{fi} 为第i个1/3倍频程的均方根加速度; $VAL_{z,fi}$ 为以时间积分常数1 s计算出的第i个中心频率铅垂向振动加速度级; $VAL_{z,max,fi}$ 为整个振动时程的第i个1/3倍频程中心频率对应的铅垂向振动加速度级的最大值。

文献[17]规定了卧室和起居室一级和二级限值,本次测试结果与卧室一级和二级限值进行对比。

3.3 均方根加速度总量评价

文献[19]提供了三向振动的均方根加速度总量计算方法,计算公式为

$$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{1/2} \quad (6)$$

其中: a_v 为均方根加速度总量; a_{wx}, a_{wy} 和 a_{wz} 分别为x,y和z方向频率计权均方根加速度; k_x, k_y 和 k_z 为方向因数。

x和y方向频率计权采用 W_d 计权,z方向采用 W_k 计权,水平向和竖向计权曲线如图6所示。根据文献[19], k_x 和 k_y 取1.4, k_z 取1.0。该标准给出人体感受振动的阈值,对应三向振动计算得到的均方根加速度总量范围(0.01~0.02 m/s^2)。

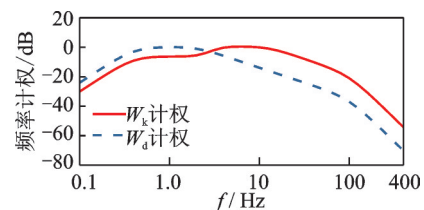


图6 水平向和竖向计权曲线

Fig.6 Horizontal and vertical weighting curves

4 测试结果与分析

4.1 Z振级

图7,8分别为工况A,B各楼层Z振级分布。由图7可知,盖上结构(RC结构和钢结构)的Z振级均大于轨道层激励的Z振级。较盖下振动激励而言,盖上结构的竖向振动响应存在放大现象。对比两类结构的Z振级可知:钢筋混凝土结构首层(F_1)的Z振级略大于钢结构首层的Z振级,但首层以上(特别是第3层)钢筋混凝土结构的Z振级小于钢

结构的 Z 振级;随着楼层数的增加,钢结构 Z 振级增加,顶层(F₄)Z 振级减小,没有放大现象;钢筋混凝土结构 Z 振级随楼层数增加呈现减小的趋势,但顶层 Z 振级放大。

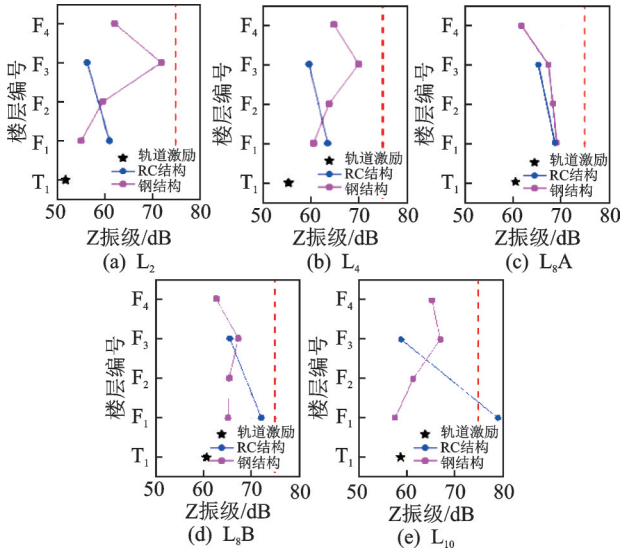


图 7 工况 A 各楼层 Z 振级分布
Fig.7 Z vibration level of each floor in condition A

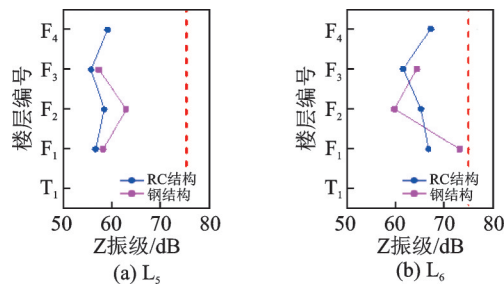


图 8 工况 B 各楼层 Z 振级分布
Fig.8 Z vibration level of each floor in condition B

对比各楼层 Z 振级和 Z 振级限值(75 dB)发现,仅钢筋混凝土结构首层出现 1 次测试工况超限,首层以上测点均未超过 Z 振级限值。钢结构虽然不存在测试工况超限,但上部楼层较钢筋混凝土结构更接近 Z 振级限值。整体而言,两类结构底部楼层振动响应基本接近,而盖上钢结构中上部楼层车致振动响应较盖上钢筋混凝土结构大。

4.2 1/3 倍频程分频带振级

由上述 Z 振级分析可知,当轨道激励在轨道 L₈A 和 L₈B 时,两类结构的 Z 振级均较大。因此,选取轨道 L₈A 和 L₈B 振动激励下,对测点进行 1/3 倍频程分频带振级评价。

图 9 为轨道层 1/3 倍频程振级(1~80 Hz)。考虑到高频成分影响,图 10 附加了 1~250 Hz 内测点

对应的轨道层频谱分布。由图可知,在 Z 振级较大测点处,轨道层测点 1/3 倍频程最大振级点出现在中心频率 40 Hz,均未超过一级和二级限值。同时,列车入库时轨道层振动激励存在高频成分^[2],振动主要分布在 30~80 Hz 和 150~180 Hz 频段。

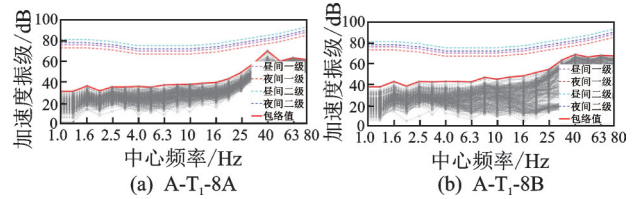


图 9 轨道层 1/3 倍频程振级

Fig.9 One-third octave plumb vibration level of track floor

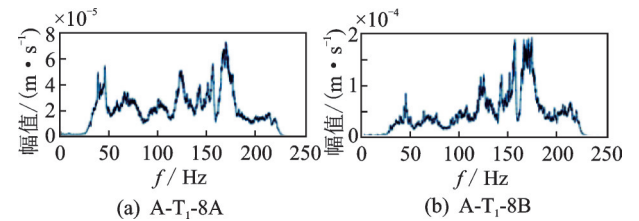


图 10 轨道层频谱分布

Fig.10 Spectral distribution of track floor

图 11,12 分别为轨道 L₈A 和 L₈B 激励下,钢筋混凝土结构和钢结构各楼层 1/3 倍频程分频带振级分布(1~80 Hz)。图 13,14 分别为 1~250 Hz 内轨道 L₈A 和 L₈B 激励下楼层频谱分布。由图 11,12 可知,上部楼层测点 1/3 倍频程最大振级点出现在中心频率 25~50 Hz 频段。对于钢结构,首层测点在 40 Hz 处超过夜间一级限值,以上楼层测点在 40 Hz 处接近夜间一级限值;钢筋混凝土结构首层测点在 25 Hz 处超过夜间一级限值,以上楼层测点均未超过夜间一

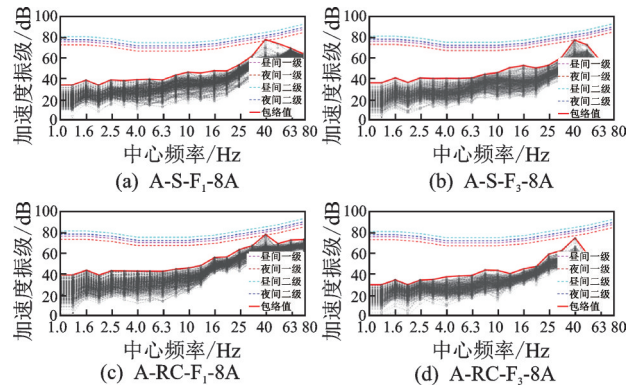


图 11 轨道 L₈A 激励下钢筋混凝土结构各楼层 1/3 倍频程分频带振级

Fig.11 One-third octave plumb vibration level of floors of reinforced-concrete structure under excitation of L₈A track

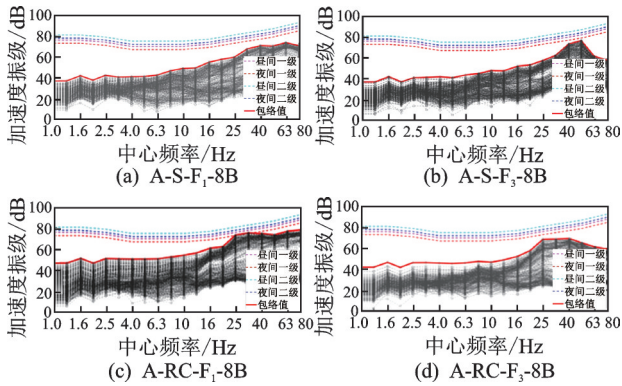


图12 轨道L₈B激励下钢结构各楼层1/3倍频程分频带振级
Fig.12 One-third octave plumb vibration level of floors of steel structure under excitation of L₈B track

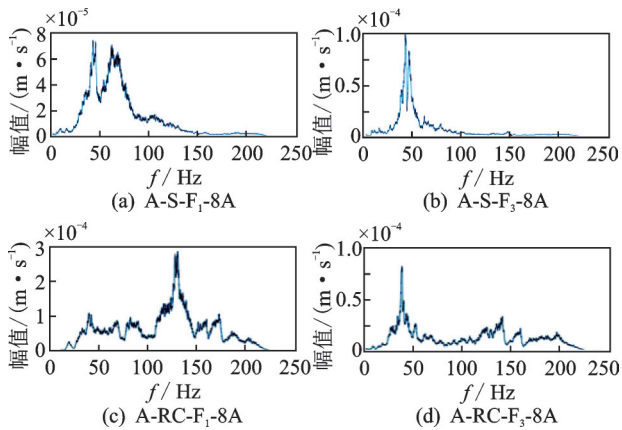


图13 轨道L₈A激励下楼层频谱分布
Fig.13 Spectral distribution of floors under excitation of L₈A track

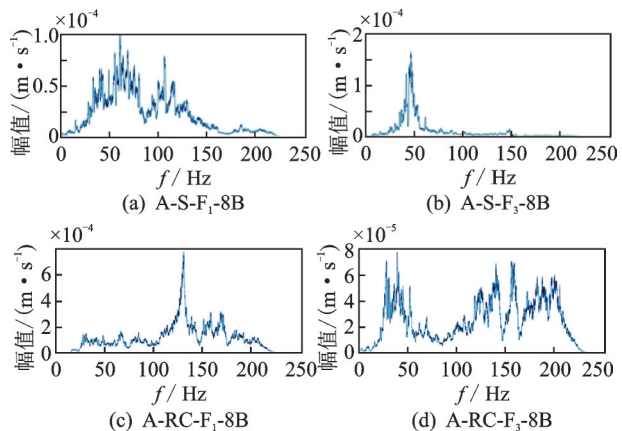


图14 轨道L₈B激励下楼层频谱分布
Fig.14 Spectral distribution of floors under excitation of L₈B track

级和二级限值。可见:在中心频率31.5 Hz及以下的加速度级振级响应强度处,钢筋混凝土结构略高于钢结构振级响应强度;在50 Hz附近,钢结构的振级响应强度略高于钢筋混凝土结构的振级响应强度。

根据频谱分布可知:钢结构测点竖向振动频段

主要分布在40~80 Hz,高频成分被钢材料过滤;钢筋混凝土结构测点竖向振动频段主要分布在30~50 Hz和100~180 Hz,高频成分未被混凝土材料过滤,特别是钢筋混凝土结构首层测点,高频成分尤为明显。因此,在盖上钢筋混凝土结构中应关注高频振动对相关设备的影响。

4.3 均方根加速度总量

图15为钢筋混凝土结构和钢结构在水平顺轨方向均方根加速度。可知,钢结构顺轨方向的均方根加速度随着楼层数增加而增大,而钢筋混凝土结构的均方根加速度在大部分工况下随楼层变化较小。

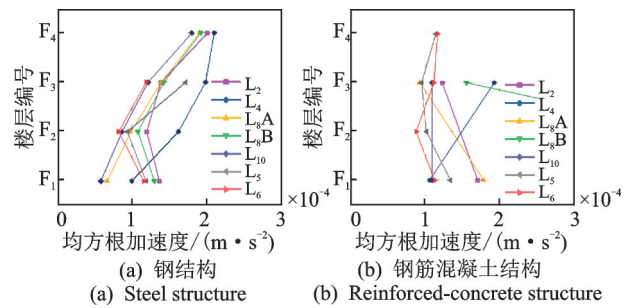


图15 水平顺轨方向均方根加速度
Fig.15 Root mean square acceleration of horizontal track direction

图16为钢筋混凝土结构和钢结构在水平垂直轨方向均方根加速度。可知,在垂直轨方向两类结构均方根加速度随楼层变化与顺轨方向一致,但垂直轨方向的均方根加速度值较顺轨方向大。

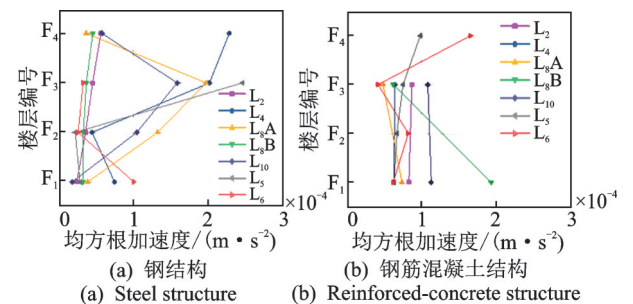


图16 水平垂直轨方向均方根加速度
Fig.16 Root mean square acceleration of horizontal vertical track direction

根据三向均方根加速度,可计算得到三向均方根加速度总量,如图17所示。最大均方根加速度总量为0.009 m/s²,小于人体感受振动阈值(0.01 m/s²),且大多数工况远小于0.01 m/s²,因此文献[19]提供的判断标准,测试的盖上结构没有对人体舒适度的

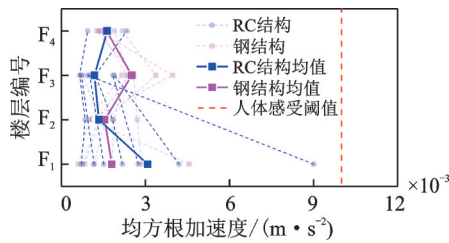


图17 三向均方根加速度总量

Fig.17 Total root-mean-square acceleration of three directions

负面影响。对比两类结构的三向均方根加速度总量,可知钢筋混凝土结构首层三向振动响应大于钢结构,而上部楼层钢结构三向振动响应大于钢筋混凝土结构。

4.4 传递函数

根据被测系统输入信号与输出信号加速度的相互关系,可估计被测系统的频域传递特性和动力特性。以工况A轨道L₄,L₈A,L₈B和L₁₀测点加速度作为振动激励,将盖上结构测点加速度作为振动响应,对比盖上不同结构类型的振动传递特性。图18,19分别为钢结构和钢筋混凝土结构楼板传递函数估计。

由图18,19可知:首层钢结构的加速度传递率接近2,远低于钢筋混凝土结构,且钢筋混凝土结构在高频处也峰值增大,表明首层钢筋混凝土结构振动响应大;随着楼层数增大,第2层钢结构加速度传递率最大,表明该楼层振动响应相对其他楼层大,随着层数增大,钢结构加速度传递率减小;对于钢筋混凝土结构,第3层的加速度传递率小于首层的加

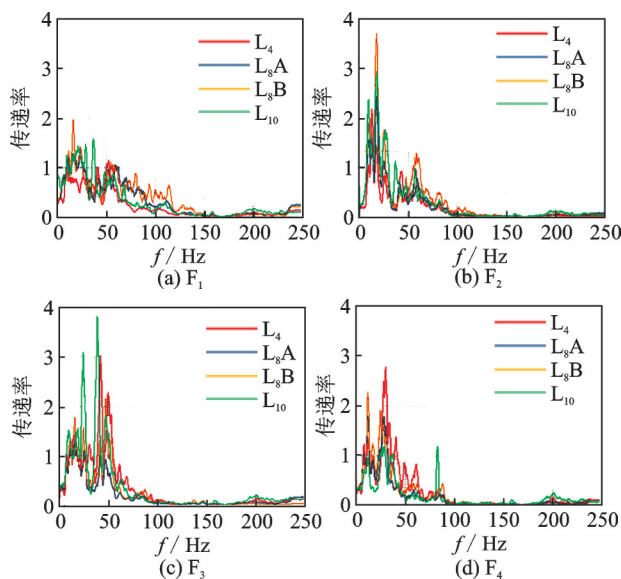


图18 钢结构楼板传递函数估计

Fig.18 Transfer function estimation of steel building

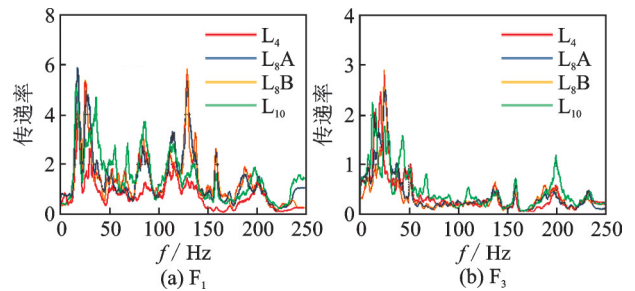


图19 钢筋混凝土结构楼板传递函数估计

Fig.19 Transfer function estimation of reinforced concrete building

速度传递率,振动响应减小。

4.5 楼板自振频率计算

基于矩形板振型方程,结合四边固定的边界条件,采用傅里叶级数解法,得到矩形板各阶振型对应的频率^[20]。其中,第1阶振型频率的计算公式为

$$\omega_{11} = \frac{\lambda_{11}}{L^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (7)$$

其中: ω_{11} 为楼板第1阶振型频率; λ_{11} 为第1阶频率系数,无量纲单位,根据文献[20]可得到不同边界条件下给出的频率系数; L 和 h 为矩形楼板长边长度和楼板厚度; ρ 为矩形楼板材料密度; E_c 为楼板弹性模量; ν 为楼板材料泊松比; D 为矩形楼板弯曲刚度, $D = \frac{E_c h^3}{12(1 - \nu^2)}$ 。

本次测试中,钢筋混凝土结构测点所在楼板的柱网布置为梯形,位于边跨。所在楼板的第1阶振型频率由等面积法估算得到^[20],计算公式为

$$\omega_{11} = \frac{15.64}{A} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (8)$$

其中: A 为楼板面积。

根据上述公式,可计算得到各层楼板的第1阶理论计算频率。本次振动测试的两类结构楼板均为钢筋混凝土楼板,根据图18,19可以得到所测楼板的竖向第1阶实测频率。笔者选取了距离测点较近的轨道L₈A和L₈B振动激励下的实测值,楼板自振频率如表2所示。

由表2可知,除钢框架结构首层和第3层外,其余各层楼板理论计算误差均不超过17.5%。钢框架结构首层楼板误差较大,原因是首层测试时堆积了施工材料,使楼板自身荷载增大,降低了楼板一阶频率^[21]。同理,钢框架结构第3层设置了支撑,以稳定顶层人群荷载,降低了楼板一阶频率。因此,在计算正常楼面荷载下的楼板频率时,理论计

表2 楼板自振频率

Tab.2 The self-resonating frequency of the floor

结构类型	楼层编号	长边跨度/m	短边跨度/m	楼板面积/m ²	楼板厚度/mm	λ_{11}	实测频率/Hz	理论计算频率/Hz	理论计算误差/%
钢框架结构	F ₁	12.80	10.65	136.32	250	4.899	18.6	38.7	108.1
	F ₂	12.80	10.65	136.32	130	4.899	17.1	20.1	17.5
	F ₃	12.80	10.65	136.32	130	4.899	15.1	20.1	33.1
	F ₄	19.05	4.30	81.92	130	5.753	11.5	12.5	8.7
钢筋混凝土框架结构	F ₁	—	—	172.80	250	3.955	26.2	23.9	-8.8
	F ₃	—	—	172.80	130	3.955	14.7	12.5	-15.0

算误差较小。

由于理论计算得到的钢框架结构中楼板自振频率略大,而钢筋混凝土框架结构中楼板自振频率略小,因此实际计算时还应考虑楼板所在结构类型的影响。

实测得到的楼板竖向第1阶振型频率最小值为11.5 Hz(钢结构顶层),满足文献[22]规定的住宅和公寓楼盖竖向自振频率不宜低于5 Hz的限值,满足文献[23-24]提到的钢筋混凝土结构和钢结构竖向自振频率7.5 Hz和9 Hz的限值。

根据以上分析可知,各楼层振动响应满足规范要求。为了提高盖上钢结构中上部楼层振动舒适度,可通过减小楼板活荷载来实现。后续设计的盖上钢结构可适当提高中上部楼层板的厚度以增大自振频率,提高其舒适度。

5 结论

1) 钢筋混凝土结构首层振级响应略大于钢结构首层振级响应,而钢结构中上部楼层Z振级响应较钢筋混凝土结构大,本次测试结构首层以上Z振级均未超限。

2) 列车入库时轨道层振动激励主要分布在30~80 Hz和150~180 Hz,钢结构测点竖向振动频段主要分布在40~80 Hz,而钢筋混凝土结构测点主要分布在30~50 Hz和100~180 Hz,存在高频成分,应关注高频振动对相关设备的影响。

3) 在中心频率为31.5 Hz及以下的加速度振级响应强度处,钢筋混凝土结构略高于钢结构的振级响应强度;50 Hz附近钢结构略高于钢筋混凝土结构的振级响应强度。

4) 两类结构在垂直轨方向的均方根加速度均比顺轨方向大,最大均方根加速度总量小于人体感受的振动阈值;上部结构除首层外,钢结构的三向振

动响应大于钢筋混凝土结构。

5) 基于振型方程得到的楼板自振频率与楼板实测频率基本接近,且两类结构中实测楼板的自振频率均满足国内规范和国外文献提出的限值。针对盖上钢结构中上部楼层,建议后续设计减小楼板活荷载或提高楼板厚度,以提高楼层舒适度。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Y, MA K, 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.
- [2] 马开强,周颖,陆德成,等.城市轨道交通上盖振动测试与振动评价方法研究[J].结构工程师,2021,37(5):1-11.
MA Kaiqiang, ZHOU Ying, LU Decheng, et al. In-situ vibration test and vibration evaluation methods research on over-track buildings[J]. Structural Engineers, 2021, 37(5):1-11. (in Chinese)
- [3] ZOU C, MOORE J A, SANAYEI M, et al. Efficient impedance model for the estimation of train-induced vibrations in over-track buildings[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(7/8): 924-942.
- [4] WALLACE M I, NG K C. Development and application of underground space use in Hong Kong[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55:257-279.
- [5] 谢伟平,陈艳明,姚春桥.地铁车辆段上盖物业车致振动分析[J].振动与冲击,2016,35(8):110-115.
XIE Weiping, CHEN Yanming, YAO Chunqiao. Vibration analysis of train depot over-track buildings induced by train load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 110-115. (in Chinese)
- [6] YAMATAKA M, IWASAKI K, HOSHIKAWA T,

- et al. Development of low-rise over-track buildings using thick laminate rubber seismic isolation materials[J]. JR East Technical Review, 2011, 21: 15-21.
- [7] ZOU C, WANG Y, MOORE J A, et al. Train-induced field vibration measurements of ground and over-track buildings[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1339-1351.
- [8] TAO Z, WANG Y, SANAYEI M, et al. Experimental study of train-induced vibration in over-track buildings in a metro depot[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109473.
- [9] YANG J, ZHU S, ZHAI W, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel[J]. Science of the Total Environment, 2019, 668: 485-499.
- [10] LYRATZAKIS A, TSOMPANAKIS Y, PSARROPOULOS P N. Efficient mitigation of high-speed train vibrations on adjacent reinforced concrete buildings[J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125653.
- [11] 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, 2(1): 112-121.
WANG Yimin, TAO Ziyu, ZOU Chao, et al. Vibration propagation law with in over-track buildings above throat area of metro depot[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 2(1): 112-121. (in Chinese)
- [12] 孙亮明, 李国豪. 地铁车辆段试车线诱发上盖住宅振动的实测研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(22): 90-96.
SUN Liangming, LI Guohao. Study on field measurement of train-induced vibration of over-track residence on the testing line of metro depot[J]. Building Structure, 2021, 51(22): 90-96. (in Chinese)
- [13] 冯青松, 王子玉, 刘全民, 等. 地铁车辆段不同区域振动特性对比分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 179-185, 200.
FENG Qingsong, WANG Ziyu, LIU Quanmin, et al. Comparative analysis of environmental vibration characteristics in different regions of a metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(14): 179-185, 200. (in Chinese)
- [14] 陈艳明, 冯青松, 刘庆杰, 等. 下沉式地铁车辆段列车库车致振动实测与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 532-538.
CHEN Yanming, FENG Qingsong, LIU Qingjie, et al. Test and analysis of vibration induced by train operation in sinking metro depot service shop[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 532-538. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 441—2019 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [16] 国家环境保护局. GB 10070—1988 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50355—2018 住宅建筑室内振动限制及其测量方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [18] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 1035—2022 城市轨道交通上盖结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 13441.1—2007 机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价第1部分: 一般要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [20] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989:455-457.
- [21] ZHU X, HAO H. Damage detection of RC slabs using nonlinear vibration features[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2009, 9(4): 687-709.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [23] BACHMANN H, AMMANN W. Vibrations in structures: induced by man and machines[M]. Iabse: [s. n.], 1987: 38-39.
- [24] MURRAY T M. Building floor vibrations[J]. Engineering Journal, 1991, 28(3): 102-109.



第一作者简介:周颖,女,1978年11月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为工程结构抗震与防灾。曾发表《基于准零刚度特性的结构竖向隔振系统研究》(《建筑结构学报》2019年第40卷第4期)等论文。

E-mail: yingzhou@tongji.edu.cn