

# 莘庄枢纽上盖建筑振动影响仿真分析

郑玄东, 耿传智

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 为研究沪杭客专列车运行时所引起的振动对莘庄综合枢纽工程中邻近线路建筑物的影响,建立了莘庄枢纽车站半空间一体化有限元模型.采用列车荷载分析模型,根据莘庄站现场实测钢轨振动加速度,采用数定表达式,计算得到轮轨荷载,仿真分析沪杭客专运行时,在碎石道床以及增设隔振基础工况下,邻近建筑振动响应.结果表明:沪杭客专列车运行,在碎石道床工况下,对邻近 10 m 的酒店式公寓建筑振动影响较大,最大振级为 79.68 dB;对相对距离 97 m 的住宅影响较小,最大振级 59.1 dB.增设隔振基础结构之后,酒店式公寓最大振级为 62.96 dB,降低 16 dB 左右,隔振效果明显,可以有效降低沪杭客专运行时引起的各楼层的振动,同时满足国家及地方的相关规范要求.

**关键词:** 客运专线振动; 上盖建筑; 动力有限元模型; 振动测试; 隔振基础结构

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

## Vibration Effect Simulation Analysis of Superstructure in Xin Zhuang Hub Project

ZHENG Xuandong, GENG Chuanzhi

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to study the vibration effect generated by rail vehicles transiting on the adjacent buildings of Hu-Hang railway passenger dedicated line in Xin Zhuang Station pivotal project, Xin Zhuang Station half space integration finite element model was established. According to loading analysis model for the train vibration and mathematical expression, wheel rail force was calculated through field test rail acceleration data of Hu-Hang railway passenger dedicated line. Simulating and analysis vibration level of Hu-Hang railway passenger dedicated line adjacent buildings, under ballast track and with additional isolation base working condition. The result shows that in the case of ballast track, vibration influence on T17 adjacent serviced apartment, at a distance of 10m from track, generated during Hu-Hang railway passenger

dedicated line operation is significant, and the  $VL_{zmax}$  is 79.68 dB; vibration influence on T17 adjacent residential building, at a distance of 97 m from track, is small, and the  $VL_{zmax}$  is 59.1 dB. Under the condition of addition isolation base structure, the  $VL_{zmax}$  of T17 adjacent serviced apartment is 62.96 dB, reducing 16 dB relating to ballast track condition, and the vibration isolation effect is significant. By applying additional isolation base structures, the  $VL_{zmax}$  values of different floors in the two building decreased effectively, national and local standards were satisfied.

**Key words:** passenger line vibration; superstructure; dynamic finite element model; vibration measurement; base isolation structure

上海莘庄综合枢纽工程由既有轨道交通 1 号线、5 号线、拟建金山支线、沪杭客专南联络线、规划轨道交通 17 号线组成五线平行换乘的一体化枢纽,物业开发部分为住宅、公寓式办公、商业部分、酒店及办公楼部分.该物业开发项目对居住环境的振动要求较高.列车经过时引起的振动对周围环境的影响<sup>[1-3]</sup>,是该类房产开发项目所面临的重要问题.因此,对该开发项目中客运专线列车运行所引起的上盖建筑物结构振动的预测分析,以及研究如何减少振动所带来的影响非常必要.

## 1 莘庄枢纽工程半空间有限元模型

根据莘庄枢纽上盖物业开发项目工程设计以及莘庄站地质勘察报告,采用 ANSYS 软件,建立了莘庄站半空间有限元模型.

莘庄枢纽车站结构有限元模型宽度为 600 m,土层深度为 92 m.网格数量为 27 万,节点数为 28 万.

莘庄枢纽车站断面结构如图 1 所示. 本文对图 1 所示整个断面进行了有限元网格划分, 图 2 为图 1 中虚线框 A 所示部分的有限元模型放大.

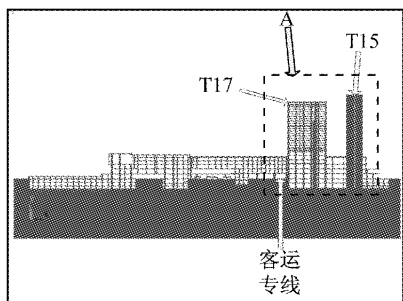


图 1 莘庄站建筑结构断面

Fig.1 Structure cross section of Xin Zhuang Station



图 2 莘庄枢纽工程有限元模型局部放大

Fig.2 Part of finite element model for Xin Zhuang Hub project

图 2 有限元模型中包括莘庄枢纽车站地质勘察的 13 层地基土层, 不同的地基土层由不同颜色有限元单元表示. 有限元模型中地基土层参数依照《莘庄站地质勘察报告终稿》中实测数据进行确定, 并且在不同地基土层的边界处建立了对应地基土层的黏弹性边界条件, 用以模拟无限边界消除由于截断效应所引起的反射波的影响<sup>[4]</sup>, 用以保证仿真计算的准确性. 模型还包括上盖邻近建筑物 T17, 与沪杭客专线路中心线的最近水平距离为 10 m, 上盖建筑物楼层高度 120 m; 上盖邻近建筑 T15 与沪杭客专线路中心线的最近水平距离为 97 m, 建筑高度 138 m, 以及 T17, T15 的桩筏基础、47 m 地下连续墙结构、沪杭客专碎石道床轨道, 莘庄车站的断面结构.

本文阻尼模型采用 Rayleigh 阻尼, 根据实测站台的振动加速度响应, 设定计算阻尼的两个自振频率为 1 Hz 和 80 Hz<sup>[5]</sup>.

### 1.1 有限元仿真分析工况

本文仿真分析两种工况下沪杭客专邻近建筑物 T17, T15 结构振动响应. 即碎石道床轨道结构工况, 在碎石道床下方增设隔振基础工况.

图 3 为碎石道床下方增设隔振基础结构示意图. 图中所示 A 部分为碎石道床轨道结构, B 部分为隔振基础, 隔振基础与地基之间采用弹性支撑, 弹性支撑可采用橡胶或钢弹簧支撑.

弹性支撑的刚度为  $7 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 弹性支撑的阻尼常数取值为  $6 \times 10^4 \text{ N} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ . 采用 Combin 14 单元进行模拟.

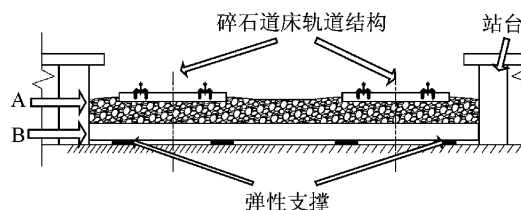


图 3 碎石道床下设隔振基础结构

Fig.3 Additional isolation base under ballast track

### 1.2 列车荷载确定

本文采用数定表达式由实测钢轨加速度计算得到钢轨上的垂向轮轨力<sup>[6]</sup>. 首先对莘庄枢纽车站进行了轨道结构及站台的振动加速度现场实测. 测试所得钢轨振动加速度时程及频谱如图 4 所示.

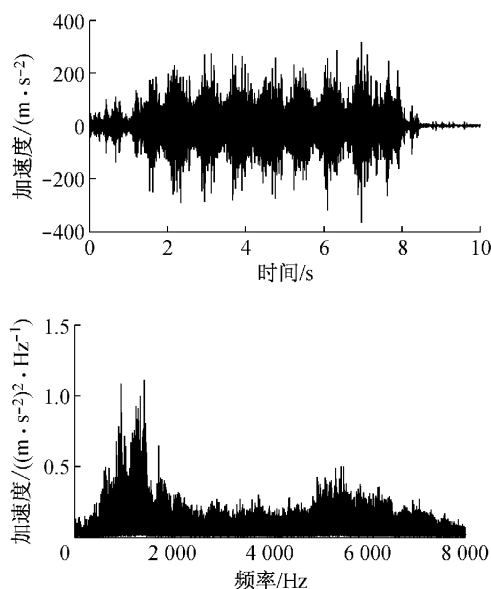


图 4 钢轨实测垂向振动加速度时程和频谱

Fig.4 Filed test time history and frequency content of vertical acceleration for rail

根据图 4 所示的实测钢轨振动加速度并采用数定表达式的计算方法, 得到碎石道床工况下的轮轨荷载的时程及频谱, 如图 5 和图 6 所示. 沪杭客专列车通过莘庄站时车速为  $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 莘庄站为碎石道床轨道结构.

现场测点以及加速度传感器安装位置见图 7 和

图 8. 现场测试依照《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071—88)<sup>[7]</sup>具体要求进行.

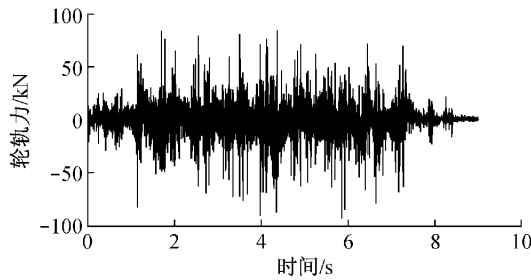


图 5 碎石道床下作用在钢轨上的竖向轮轨力时域  
Fig.5 Time history of wheel-rail force on rail for general ballast track

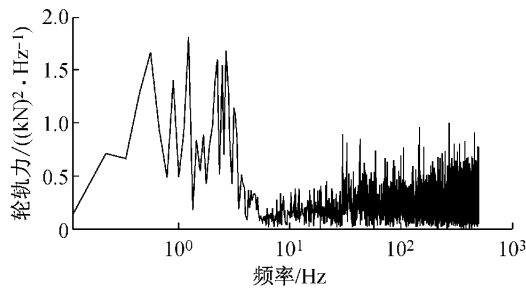


图 6 碎石道床下作用在钢轨上的竖向轮轨力频谱  
Fig.6 Frequency content of wheel-rail force on rail for general ballast track

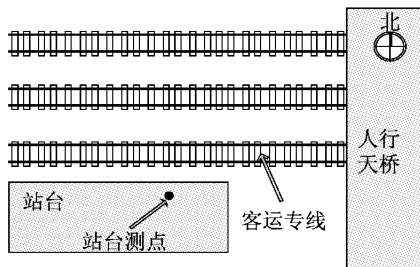


图 7 振动测试现场传感器布置  
Fig.7 Vibration sensors placement in test field



图 8 测试现场振动加速度传感器安装  
Fig.8 Mounting of vibration sensors in test field

对于沪杭客专客运专线,碎石道床工况下将由钢轨垂向加速度计算得出的轮轨荷载施加在半空间模型中的钢轨上,计算结构的振动响应.

另外,将轮轨荷载施加到单独建立的基础隔振有限元模型中,计算得到弹性基础位置处的支反力,然后将该支反力施加到半空间模型的路基之上计算结构的振动响应,隔振基础的弹性支座的支反力时程以及频谱曲线,如图 9 和图 10 所示.

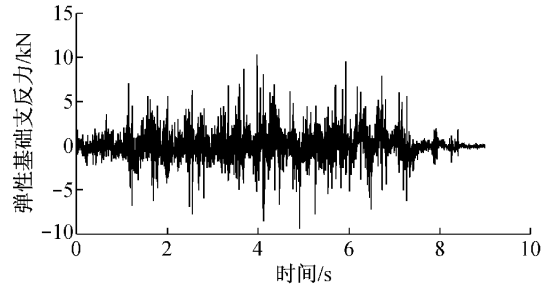


图 9 隔振基础的弹性支座支反力时程  
Fig.9 Time history of base isolation support force

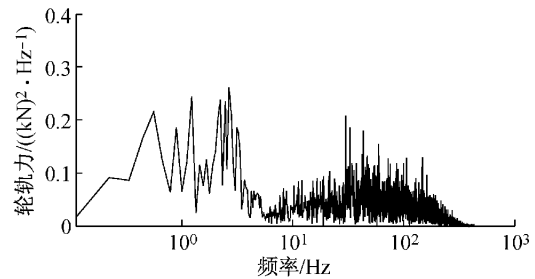


图 10 隔振基础的弹性支座支反力频谱  
Fig.10 Frequency content of base isolation support force

对比图 6、图 10 可以看出经过弹性基础后传递到路基上的荷载频域范围主要集中在 200 Hz 范围内.

## 2 有限元仿真结果分析

对仿真分析结果,选取 T17 及 T15 建筑物的不同楼层卧室房间的楼板与剪力墙相连接位置处以及楼板中部作为分析对象.

### 2.1 时域以及频谱分析

图 11 和图 12 分别为碎石道床和碎石道床下方增设隔振基础工况下,建筑 T17 一层楼板端部位置处垂向振动加速度时域和频谱.图 13 和图 14 分别为碎石道床和碎石道床下方增设隔振基础工况下,建筑 T15 一层楼板端部位置处垂向振动加速度时域和频谱.

图 11、图 13 表明沪杭客专客运专线上盖建筑物 T17 的影响较大,而对相距较远的 T15 建筑的影响较小. T17 建筑一层加速度峰值为  $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ; T15 一层加速度峰值为  $0.002 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . 同时对比图

11、图 13 中频谱可以得出,在碎石道床轨道工况下, T17 振动加速度主要集中在 0~60 Hz 范围内,对比 T15 振动加速度主要集中在 0~20 Hz 范围内。

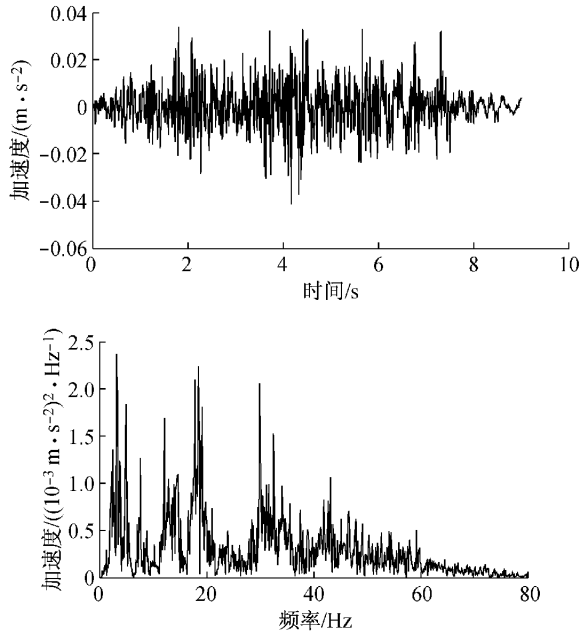


图 11 碎石道床下 T17 一层楼板端部位置垂向振动加速度时域和频谱

Fig.11 Time history and frequency content of vertical vibration acceleration on the floor end of the first floor of T17 building for ballast track

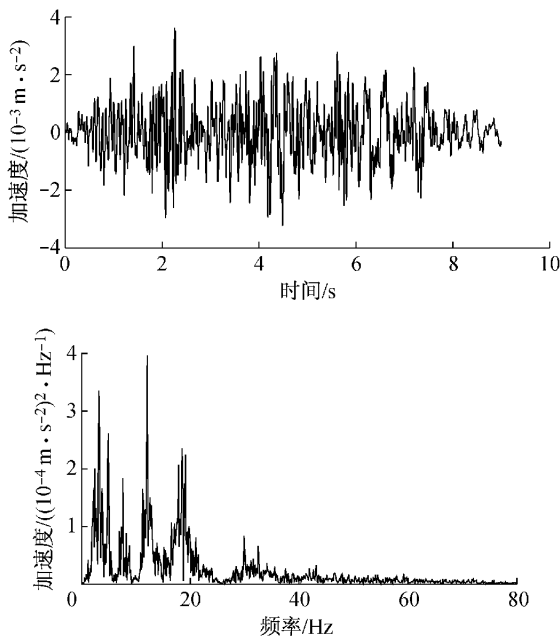


图 12 基础隔振结构下 T17 一层楼板端部位置振动加速度时域和频谱

Fig.12 Time history and frequency content of vertical vibration acceleration on the floor end of the first floor of T17 building for base isolation structure

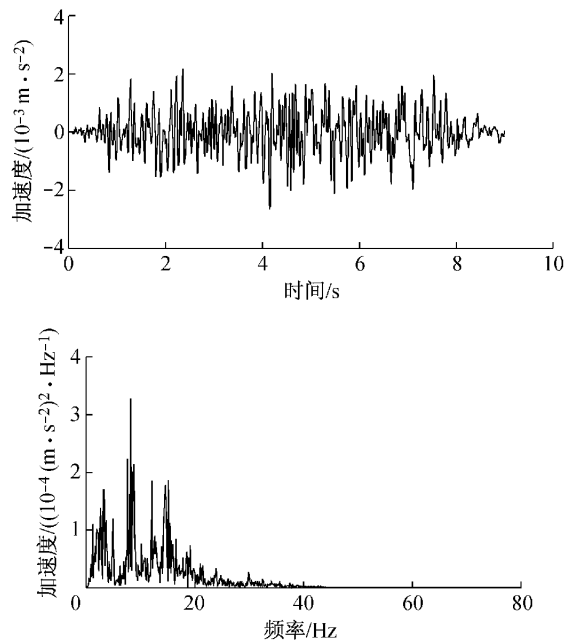


图 13 碎石道床下 T15 一层楼板端部位置振动加速度时域和频谱

Fig.13 Time history and frequency content of vertical vibration acceleration on the floor end of the first floor of T15 building for ballast track

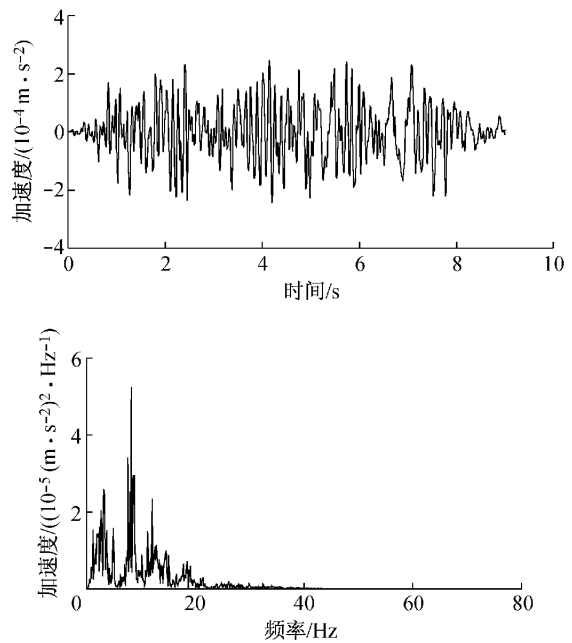


图 14 基础隔振下 T15 一层楼板端部位置振动加速度时域和频谱

Fig.14 Time history and frequency content of vertical vibration acceleration on the floor end of the first floor of T15 building for base isolation structure

通过对比图 11、图 12 可以看出,通过基础隔振

结构,能明显降低客运专线列车带来的中高频振动影响,基础减振后 T17 一层振动加速度峰值为  $0.0036 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,相对碎石道床工矿,加速度峰值减少了 88%。

### 2.2 加速度 1/3 倍频程分频振级分析

对 T17 及 T15 建筑一层卧室房间的楼板与剪力墙相连接位置处以及楼板中部进行加速度 1/3 倍频程分频振级分析。

结果如图 15 和图 16 所示。通过对比可以明显看出,沪杭客专客运专线对 T17 的振动影响大于对 T15 的影响。T17 建筑分频振级在 8 Hz 左右达到最大值为 80 dB,T15 建筑分频振级在 8 Hz 左右达到最大值为 52 dB。

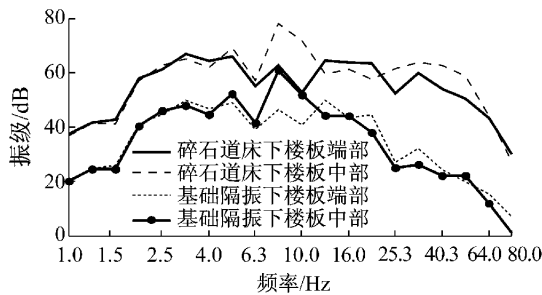


图 15 建筑 T17 一层不同工况下 1/3 倍频程分频振级

Fig. 15 One third octave vibration frequency division level  $VL_z$  of the first floor in T17 building under different conditions

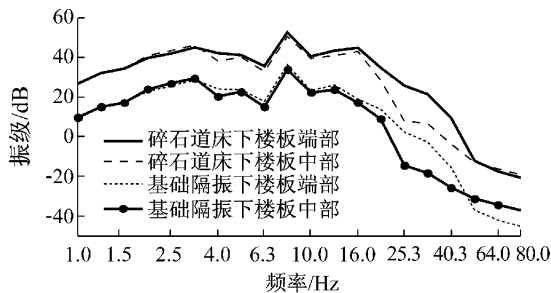


图 16 建筑 T15 一层不同工况下 1/3 倍频程分频振级

Fig. 16 One third octave vibration frequency division level of the first floor in T15 building under different conditions

在碎石道床下方增设隔振基础结构后,T17 一层处楼板中部位置处分频振级最大值为 60.8 dB,相对碎石道床工况的 78.1 dB 减小了 17.3 dB;T15 一层处楼板中部位置处分频振级最大值为 34.2 dB,相对碎石道床工况的 50.5 dB 减小了 16.3 dB。通过图 15,结合图 11 和图 12 可以看出:基础隔振结构能明显降低 T17 分频振级在 20~80 Hz 范围内的振动,分频振级最大减少 30 dB 以上。

### 2.3 建筑 T17 和 T15 最大振级分析

对仿真结果 T17 及 T15 建筑结构的垂向振动加速度进行分析,计算得到最大总振级  $VL_{z \max}$  值, $VL_z$  计算方法依照 GB 10071—88 进行。计算得到 T17,T15 建筑  $VL_{z \max}$  均值如表 1 所示。

表 1 不同建筑  $VL_{z \max}$  均值

Tab.1 $VL_{z \max}$ mean values of different buildings dB		
工况	T17	T15
碎石道床	79.68	59.10
基础隔振	62.96	41.78

针对本项目工程,采用文献[8-10],建议采用昼间 70 dB,夜间 67 dB,并用  $VL_{z \max}$  计算结果进行评价。

表 1 列出了 T17 及 T15 建筑观察点  $VL_{z \max}$  均值。通过表 1 可以看出,在普通碎石道床工况下 T15 建筑的振动没有超出标准的规定,但是 T17 建筑的  $VL_{z \max}$  均值为 79.68 dB,超出夜间标准约 12 dB;采用基础减振之后,T17 建筑观测点  $VL_{z \max}$  均值为 62.96 dB,可以满足国家及地方标准对居住环境要求的振动限值。

## 3 结论

本文建立莘庄站综合枢纽工程半空间有限元模型,根据现场实测钢轨加速度,运用数定表达式模拟轮轨荷载,最后对邻近建筑物进行振动影响仿真分析,所得结果如下:

(1) 碎石道床工矿下,T17 建筑分频振级在 8 Hz 左右达到最大值为 80 dB,T15 建筑分频振级在 8 Hz 左右达到最大值为 52 dB。在碎石道床下方增设隔振基础结构后,T17 一层处楼板中部位置处分频振级最大值为 60.8 dB,相对碎石道床工况的 78.1 dB 减小了 17.3 dB;T15 一层处楼板中部位置处分频振级最大值为 34.2 dB,相对碎石道床工况的 50.5 dB 减小了 16.3 dB。基础隔振结构能明显降低 T17 分频振级在 20~80 Hz 范围内的振动,分频振级减少 30 dB 以上。

(2) 仿真分析结果表明,客运专线列车经过时对上盖建筑物 T17 的影响较大,普通碎石道床工况下结构振动  $VL_{z \max}$  均值为 79.68 dB;对 T15 的影响较小, $VL_{z \max}$  均值为 59.1 dB。

(3) 在碎石道床下方增设隔振基础,能够有效减少客运专线列车运行时对莘庄站上盖建筑 T17 所