

DOI: 10.11779/CJGE2017S2053

软土区地铁不同类型轨道振动测试分析

丁 智¹, 王永安², 顾晓卫³, 黄小斌³, 魏新江¹, 魏 纲^{*1}

(1. 浙江大学城市学院土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430030; 3. 杭州杭港地铁有限公司, 浙江 杭州 310017)

摘要: 软土区地铁隧道结构在列车荷载作用下, 工后沉降问题已引起广泛关注, 而考虑不均匀沉降下的轨道动力特性实测研究却未见报道。以浙江省某地铁隧道为研究对象, 对该隧道两个轨道断面进行了隧道沉降变形观测和钢轨竖向振动测试。基于监测结果, 分析了两断面沉降变形和振动实测结果的差异, 并对软土区地铁轨道型式进行优选分析。研究结果表明: 理论模型计算与振动实测结果量值相当, 但理论计算模型未考虑不均匀沉降及轨道弯曲效应, 较实测值小; 钢弹簧浮置板轨道钢轨振级比普通整体式轨道小 10 dB; 钢弹簧浮置板轨道固有频率较普通整体式轨道低, 列车经过时, 较早达到振动峰值, 列车经过后, 较晚恢复平息; 整体式轨道振动对周围土体的扰动大于钢弹簧浮置板轨道, 因前者沉降值大于后者, 沉降值变大又会进一步加大振动影响。为确保良好的运营条件, 建议软土区不均匀沉降工况下采用钢弹簧浮置板等减振轨道型式。

关键词: 软土地区; 地铁隧道; 不均匀沉降; 钢轨振动; 现场测试

中图分类号: TU447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)S2-0220-04

作者简介: 丁 智(1977-), 男, 安徽铜陵人, 博士, 副教授, 主要从事地铁施工及运营对周边环境影响方面的研究与教学工作。E-mail: dingz@zucc.edu.cn。

Vibration of different types of tracks of subway in soft soil

DING Zhi¹, WANG Yong-an², GU Xiao-wei³, HUANG Xiao-bin³, WEI Xin-jiang¹, WEI Gang¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China; 2. Wuhan Metro Group Co., Ltd.,

Wuhan 430030, China; 3. HANGZHOU MTR, Hangzhou 310017, China)

Abstract: The settlement of subway tunnel due to the rail load after its construction has caused wide concern. But the report of dynamic characteristics of railroad considering uneven settlement has not been reported. Based on a subway tunnel in Zhejiang Province, by choosing two sections of the tunnel, the settlement deformation is measured and the vertical vibration of iron rails is tested. The differences of tunnel settlement deformation and rail vibration are analyzed based on the results. The optimization analysis is conducted for the two section styles. The research results show that the calculated values by the theoretical model agree with the measured ones. But the theoretical results are less than the measured ones because it does not consider the uneven settlement and bending effect. The rail vibration level of steel spring floating slab track is 10 dB smaller than that of the ordinary monolithic track. The vibration acceleration of steel spring floating slab track rail reaches the peak value earlier when the car arrives and quells down later when the car leaves because the inherent frequency of the former is lower than the latter one. The vibration of ordinary monolithic track affects the surrounding soil stronger than the vibration of steel spring floating slab track. Larger bigger settlement will cause larger vibration. In order to ensure good operation conditions, it is suggested that the rail track style should adopt steel spring floating slab track in soft soil districts with uneven settlement.

Key words: soft soil district; subway tunnel; uneven settlement; iron rail vibration; field test

0 引言

由于地铁列车的振动荷载往复进行, 软土区地铁隧道常产生不均匀沉降。实测资料表明: 杭州地铁 1 号线运营半年来局部路段沉降达 20 mm, 上海地铁 1 号线运营近 10 a 来局部路段沉降达 200 mm^[1]。隧道沉降又会加剧列车的振动响应, 从而使隧道变形进一步增大。如此循环往复, 地铁的运营环境势必越来越

恶劣, 因此有必要对软土区地铁轨道振动和隧道沉降变形两者之间的相互影响关系进行研究分析。

目前已有轨道振动研究主要是通过对地铁隧道道

基金项目: 国家自然基金项目(51508506); 浙江省自然基金项目(LQ16E080008); 杭州市科技计划项目(20160533B94、20172016A06); 浙江省交通厅科研计划项目(2017006)

收稿日期: 2017-08-02

*通讯作者(E-mail: weig@zucc.edu.cn)

床板、隧道壁、地面及周围建筑的振动情况进行监测, 比较各种轨道形式及减振措施的减振效果。涂勤明等^[2]利用有限元进行数值模拟, 比较分析整体轨道、弹性支撑块轨道及钢弹簧浮置板轨道三种轨道型式的减振效果; 文献[3]通过实测, 重点分析了不同轨道形式下轨道的隔振效果; 文献[4]基于实测, 对轨道各种减振措施如轨道减震器、弹簧扣件、梯形轨枕、弹性短轨枕、钢弹簧浮置板等进行减振效果评价。现有成果对软土区隧道不均匀沉降下地铁振动的研究较少, 此工况下的钢轨振动实测研究更未见报道。

本文基于上述研究现状, 对浙江省某地铁隧道整体式和钢弹簧浮置板轨道两个断面进行了沉降变形和振动监测, 构建数值模型以计算验证振动测试结果的可靠性。对实测结果进行分析, 比较不同轨道型式下的振动差异, 研究轨道振动与隧道沉降变形的相互影响, 并对软土区地铁轨道型式进行优选分析。

1 地质概况及轨道型式

1.1 地质概况

项目所在地为冲积平原地貌, 地质主要为第四系冲海积、海相及河流相沉积物, 下伏基岩为安山玢岩。其中整体式轨道断面(以下称1断面)处土层分为9层, 隧道顶部埋深9.8 m, 隧道所处地层土性为砂质黏土及粉砂土。钢弹簧浮置板断面(以下称2断面)所在地势较1断面低, 土体性质较差, 从上到下共分为11层, 隧道顶部埋深为20.3 m, 隧道所处土层为淤泥质粉质黏土, 如图1所示。

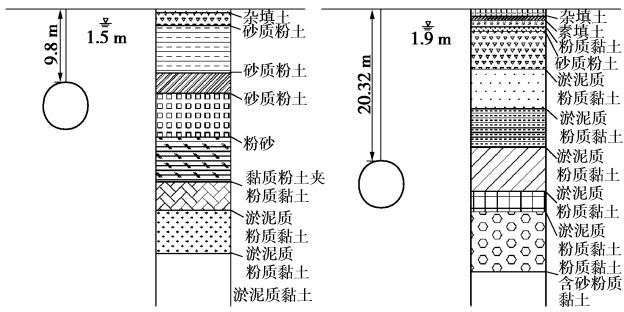


图1 两组断面地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of two sections

1.2 轨道型式

监测断面分别为整体式轨道和钢弹簧浮置板轨道, 两种轨道型式衬砌断面内半径为2.75 m, 衬砌壁厚为0.35 m, 衬砌采用C50混凝土进行预制, 轨道板及钢弹簧浮置板均采用C30混凝土浇筑。

2 监测仪器布置

本文以杭州地铁1号线为工程实例, 整体式轨道与钢弹簧浮置板轨道监测点分别位于里程号

K29+135.000(对应环数为NO.570环)、里程号K16+647.726(对应环数为NO.748环)断面区域。

2.1 隧道变形监测仪器布置

为了掌握地铁运营6个月后区间隧道结构的变形情况, 在区间隧道内按6 m间距(每5环管片)布设沉降监测点。沉降监测点布设在整体道床上, 水准测量仪器采用天宝DINI03精密水准仪及条码式钢瓦尺。

2.2 轨道振动监测仪器布置

振动监测采用自主研发的光纤光栅解调仪和加速度传感器进行测试数据采集^[5], 采样频率1000 Hz。本次测试内容包括: 在两个断面钢轨下部布置光纤光栅加速度传感器, 以实时监测列车通过时的钢轨振动加速度变化情况。传感器参数如下表1。图2为仪器传感器和解调仪现场安装图。

表1 传感器技术参数表

Table 1 Parameters of sensors

断面	位置	中心波长/nm	灵敏度/(m·s ² ·nm ⁻¹)	3 dB带宽	反射率/%
1	钢轨	1541.9	512.21	≤0.25	≥90
2	钢轨	1549.7	69.942	≤0.25	≥90



图2 传感器及解调仪现场安装图

Fig. 2 Installation of sensors and instruments

3 实测数据处理及验证分析

3.1 沉降实测数据处理分析

整体式轨道监测隧道沉降波幅变化较大, 变化范围为2~6 mm, 振动监测断面处沉降值约为4 mm。而钢弹簧浮置板轨道沉降值变化则较小, 变化范围为1~3 mm, 振动监测断面处约为2 mm。

由于地质条件, 整体式轨道断面处的土体性质优于钢弹簧浮置板轨道, 而在沉降监测曲线中前者隧道沉降要大于后者, 故列车通过时整体式轨道振动响应对周围土体的扰动大于钢弹簧浮置板轨道, 有必要对不均匀沉降工况下的钢轨动力测试进行研究。

3.2 振动实测合理性验证

为验证振动实测结果的可靠性, 采用杭州实际地铁列车和轨道参数建立车体-轨道耦合振动模型。6节车体均采用10自由度悬挂系统模型模拟。车轮底下钢轨采用长300 m的两端简支Euler梁进行模拟, 钢轨通过扣件与钢弹簧浮置板相连, 单块板上有40个扣件。浮置板采用两端自由的Timoshenko梁模拟, 板长

25 m, 模型中共包含 12 块浮置板。单块浮置板底下由 16 个钢弹簧承接, 钢弹簧之下是刚性地基, 钢弹簧及扣件均采用离散分布的弹簧阻尼单元模拟, 且均为实际双侧弹簧等效叠加而成。地基土体则近似等效为均匀分布的弹簧阻尼单元。图 3 为所建理论模型简图。

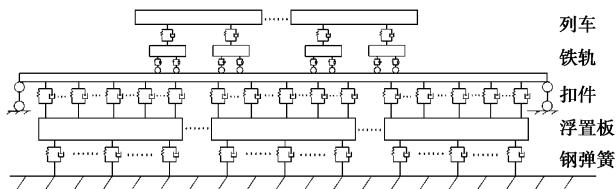


图 3 理论计算模型图

Fig. 3 Theoretical model

模型中车体及转向架考虑竖直位移及转角两个自由度, 对应质量及转动惯量用 M_c , I_c , M_b , I_b 表示, 车轮只考虑竖向位移, 质量用 M_w 表示。车体与转向架之间为二系悬挂 K_2 , C_2 , 转向架与车轮之间为一系悬挂 K_1 , C_1 。车长为 L_c , 同一转向架之间轮距 L_w , 转向架间距 L_b 。钢轨考虑为 Euler 梁, 因此只考虑竖向挠度, 钢轨抗弯刚度为 EI_r , 单位长度质量 ur , 轮轨接触刚度为 k_{beam} 。浮置板为 Timoshenko 梁, 考虑挠度和转角两个自由度, 弹性模量为 E_E , 剪切模量为 G_G , 密度为 ρ , 截面面积为 A , 截面惯性矩 I 由浮置板上下两个矩形面叠加换算, 剪力修正系数 κ 取常数 0.8451。铁轨与浮置板之间扣件刚度和阻尼为 k_{rs} , c_{rs} , 浮置板之下钢弹簧刚度和阻尼为 k_{st} , c_{st} 。以上各参数取值参考文献[6]。计算模型车速为 15 m/s, 计算时间步距取 0.002 s, 总时长 12 s。

图 4 是采用上述理论计算模型计算所得钢轨振动加速度时程图, 图 5 为钢弹簧浮置板轨道断面处钢轨振动加速度实测图。可知理论计算所得钢轨振动加速度峰值为 20 m/s^2 , 实测钢轨加速度峰值为 60 m/s^2 , 理论值与实测值量级上一致, 且理论计算所得结果图可以明显看出六节车辆经过时引起钢轨产生振动峰值, 而实测结果图这一规律则不明显。因为理论计算模型未考虑轨道线路弯曲效应, 而且计算模型中也未加入轨道的不均匀沉降。实际地铁振动有较多干扰因素, 规律性不如理论计算所得结果。

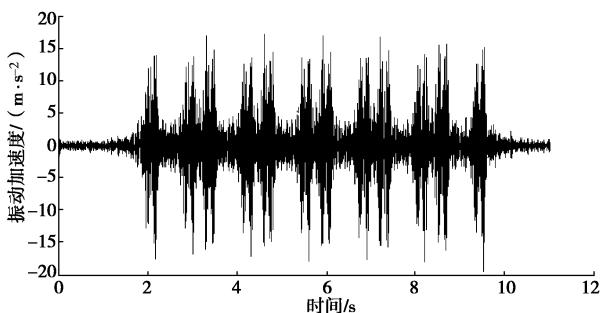


图 4 理论计算振动加速度时程图

Fig. 4 Theoretical vibration acceleration history

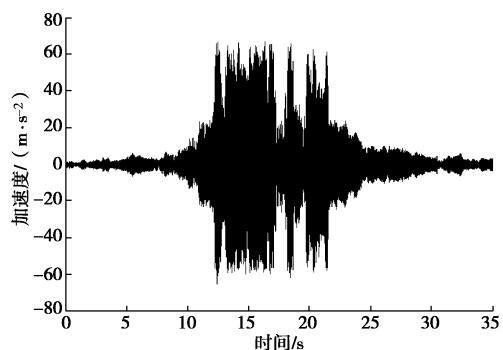


图 5 钢弹簧浮置板轨道钢轨振动加速度时程图

Fig. 5 Rail vibration acceleration history of SSFST

表 2 为国内已有的关于浮置板轨道钢轨振动加速度实测与研究成果, 目前关于这一方面的研究尚不成熟, 所得钢轨振动加速度差别较大。本文浮置板轨道钢轨振动加速度的实测与理论值均在已有的研究成果范围内, 可以在一定程度上验证实测结果的可靠性。

表 2 已有研究成果表

Table 2 Schemes of existing research results

文献	轨道型式	方法	钢轨加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
刘鹏辉等 ^[4]	钢弹簧浮置板	实测	16.98
吴磊 ^[6]	钢弹簧浮置板	数值计算	40
魏金成等 ^[7]	钢弹簧浮置板	有限元	140

3.3 振动实测数据对比分析

图 6 是实测所得整体式轨道钢轨的振动加速度时程图, 图中可以得出该断面钢轨振动加速度峰值为 30 倍重力加速度左右。图 5 中钢轨振动峰值为 6 倍重力加速度, 与刘鹏辉等^[4]、吴磊等^[6]研究成果相比其量值是合理的。整体式轨道较钢弹簧浮置板轨道的钢轨振动加速度要大很多, 这是由于整体式轨道的整体刚度大于钢弹簧浮置板轨道, 且该段轨道的沉降值要大于钢弹簧浮置板轨道。

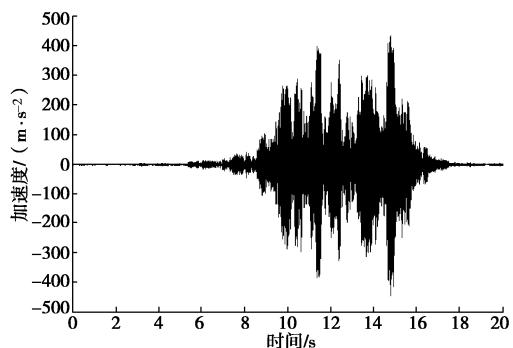


图 6 整体式轨道铁轨振动加速度时程图

Fig. 6 Rail vibration acceleration history of OMT

此外, 整体式轨道振动加速度峰值段对应振动计算得到的频率值为 200 Hz, 而钢弹簧浮置板轨道则为 125 Hz 左右。进一步说明整体式轨道的整体刚度要大

于钢弹簧浮置板轨道的整体刚度。钢弹簧浮置板振动峰值频率较低, 因此也可以较早地将振动能量传递周围低频振动环境中, 但同时在地铁列车通过后, 钢弹簧浮置板铁轨振动也容易受周围低频环境回振影响, 因而其振动时域图加速度降低较慢。

图 7 为两断面三分之一倍频程对比图, 图中可以得出在整体频域内, 钢弹簧浮置板轨道钢轨的加速度振级要比整体式轨道钢轨振级要小 10 dB 左右。但在各自峰值频段内, 钢轨的振级均明显有增加。在钢弹簧浮置板轨道钢轨峰值频率处, 其振动加速度分量甚至还大于整体式轨道铁轨的振级。因此, 在进行轨道及行车设计时, 应尽量避免振动激励接近钢轨的振动峰值频率, 以免发生共振影响行车安全及乘车舒适度。

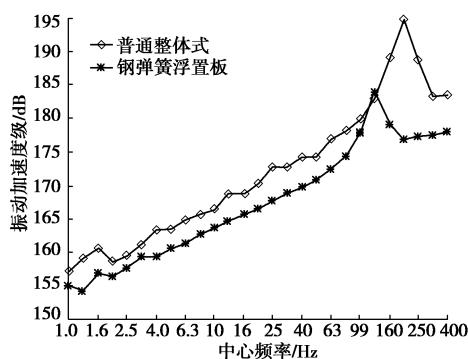


图 7 三分之一倍频程图

Fig. 7 1/3 times frequencies of two sections

4 结 论

(1) 理论模型计算钢轨加速度峰值为 20 m/s^2 , 实测钢弹簧浮置板钢轨加速度峰值为 60 m/s^2 , 两者峰值量级是一致的。但计算模型未考虑轨道不均匀沉降及轨道线路弯曲效应, 因此计算结果比实测值小。

(2) 因钢弹簧浮置板轨道固有频率较整体式轨道低, 因此前者铁轨振动加速度在列车经过时, 较早达到振动峰值, 但在列车经过后, 较晚恢复至平息状态。

(3) 整体式轨道处土体性质较好, 但是轨道沉降值大, 钢弹簧浮置板轨道处土体性质较差, 但是轨道沉降值却比较小, 整体式轨道振动对周围土体的扰动要比钢弹簧浮置板轨道大。较大的运营振动使得周围土体沉降也更大, 从而进一步加大地铁振动响应。因此软土地区地铁轨道选型需考虑地基不均匀沉降工况, 建议采用钢弹簧浮置板轨道进行减振, 以减小列车荷载对周围土体的振动影响。

参考文献:

- [1] 丁智, 张涛, 魏新江, 等. 排水条件对不同固结度软黏土动力特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 893 - 899. (DING Zhi, ZHANG Tao, WEI Xin-jiang, et al. Experimental study on effect of different drainage conditions on dynamic characteristics of soft clay under different degrees of condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 893 - 899. (in Chinese))
- [2] 涂勤明, 雷晓燕, 毛顺茂. 地铁产生的环境振动及轨道结构减振分析[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4): 178 - 183. (TU Xiao-ming, LEI Xiao-ming, MAO Shun-mao. Analyses of subway induced environment vibration and vibration reduction of rail track structure[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4): 178 - 183. (in Chinese))
- [3] 孙成龙, 高亮. 北京地铁 5 号线钢弹簧浮置板轨道减振效果测试与分析[J]. 铁道建筑, 2011(4): 110 - 113. (SUN Cheng-long, GAO Liang. Measurement and analysis of vibration-reducing effect for steel spring floating slab track on Beijing metro line No.5[J]. Railway Engineering, 2011(4): 110 - 113. (in Chinese))
- [4] 刘鹏辉, 杨宜谦, 尹京. 地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 31 - 36. (LIU Peng-hui, YANG Yi-qian, YIN Jing. Test and analysis on vibration of different track structures in tunnel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 31 - 36. (in Chinese))
- [5] 丁智, 王永安, 魏新江, 等. 强度解调型光纤光栅加速度传感器: 中国, ZL 2014 2 0812787.7[P]. 2015. (DING Zhi, WANG Yong-an, WEI Xin-jiang, et al. Type of intensity demodulation FBG acceleration sensor: China, ZL 2014 2 0812787.7[P]. 2015. (in Chinese))
- [6] 吴磊. 地铁车辆-钢弹簧浮置板轨道耦合动态行为的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (WU Lei. Dynamic behavior research of Metro vehicle-steel spring floating slab track coupling system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [7] 魏金成, 何平, 李宇杰. 地铁钢弹簧浮置板轨道的减振效果分析[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 17 - 24. (WEI Jin-cheng, HE Ping, LI Yu-jie. Analysis on the Vibration Attenuation of Metro Steel Spring Floating Slab Track[J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 17 - 24. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)