

Research on the Influence of Subway Train Vibration on Tunnel Structure Safety and Surrounding Environment

Bin Wang

China Railway 15th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai, 200070, China

Abstract

With the development of subway construction in city, the impact of train operation to the structure safety and surrounding environment has become a common social problem, and researchers pay great attention to it. This paper analyzes the influence of subway vibration to the tunnel structure and environment by numerical simulation, thus obtains the influence on the building of ground structures which the subway crossing, and gives the evaluation conclusion from qualitative and quantitative perspectives according to the national standards.

Keywords

subway vibration; crossing buildings; numerical simulation analysis; structural impact assessment; environmental impact assessment

地铁列车振动对隧道结构安全及周边环境影响性研究

王宾

中铁十五局集团有限公司, 中国·上海 200070

摘要

随着城市轨道交通建设的逐步深入, 列车运行引起振动对结构安全和周边环境的影响已经成为普遍的社会问题, 也引起研究人员的高度重视。论文通过数值仿真的方式分析了地铁振动对隧道结构和环境的影响, 从而获取了对该地铁所穿越的上部建筑的影响, 并参照国家相关规范从定性和定量两个角度给出影响性的评价结论。

关键词

地铁振动; 穿越建筑物; 数值仿真分析; 结构影响评价; 环境影响评价

1 引言

随着城市轨道交通建设的逐步深入, 城市密集建筑群中建造轨道交通或者地铁线路穿越既有建筑物的现象已经极为普遍, 并且由此引发了一些社会问题。特别是地铁运行中的列车振动问题, 对沿线人们的工作和生活造成的影响, 受到越来越多的关注。实测资料显示, 地铁列车通过时, 振动荷载传至隧道周围土体引起的动力响应是周而复始的循环动力响应, 影响隧道结构的安全; 地铁线路的振动将会传导至建筑基础, 引起建筑结构振动, 影响建筑的安全^[1]; 列车运行的振动引起的噪声还会影响周边居民的身体健康。

国家标准 GB10070—1988《城市区域环境振动标准》对建筑室外 0.5m 以内区域环境振动采用铅垂向最大 Z 振级 (VL Zmax) 进行了规定, “混合区、商业中心区”昼间振动不得超过 75dB, 夜间不得超过 72dB。JGJ/T 170—2009《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》结合建筑物室内振动频谱特点, 针对易产生人体烦恼且容忍度较差的低频振动 (4~200Hz) 采用分频最大振级 (VL max) 进行限制; “居住、商业混合区, 商业中心区”昼间不得超过 70dB, 夜间不得超过 67dB。为提升项目建筑开发品质, 提高居住舒适性, 在此采用上述 2 个指标同时评价, 采用夜间指标限值进行控制, 即最大 Z 振级不超过 72dB, 分频最大振级不超过 67dB。

据统计, 截至 2020 年 12 月 31 日, 中国内地共有 44 座城市开通城市轨道交通运营里程 7715.31km, 其中地铁新增运营里程为 1126.72km。“十四五”期间, 中国城市轨道交通运营里程有望新增 5000km, 年均新增 1000km 左右, 届时总运营里程将达到 13000km^[2-3]。

庞大的城市轨道交通运营规模、列车运行引起振动必然性, 以及居民环保意识的增强, 势必会进一步加深矛盾的凸显。论文通过数值分析的方式对城市地铁穿越上部建筑的案例开展研究工作, 从而为特定地质环境中地铁列车振动分析方法提供技术参考。

【作者简介】王宾 (1974—), 男, 中国河南浉池人, 本科, 中级工程师, 从事地下工程研究。

2 工程概况

根据图1可知,地铁上部楼房采用桩基础,所有桩基础均分楼房自重,每层楼房自重按照20kPa考虑,将基础荷载进行等效,等效为均布荷载, $P=20\text{kPa}$ (单层楼房每平方米荷载) $\times 7$ (楼楼层数) $=140\text{kPa}$ 。

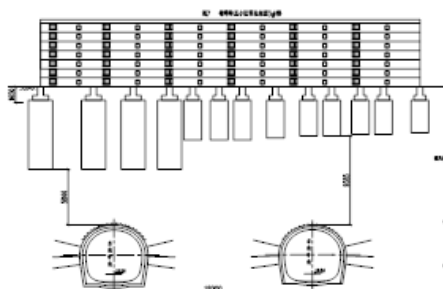


图1 隧道与上部建筑位置关系图

振动荷载时程按照图2取值,计算时间取为 $t=L/v$,列车由一端驶入,移动速度为19.0m/s。

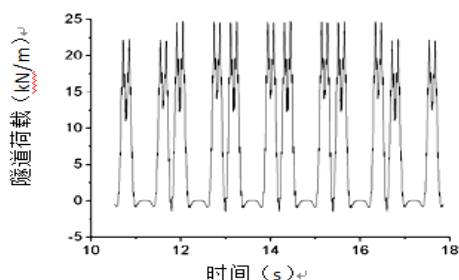


图2 隧道轮载分布荷载时程曲线

3 数值仿真分析模型

隧道内轮廓净宽5.1m、净高5.59m,初衬厚度为0.25m,二衬厚度为0.3m。初衬混凝土等级为C25,二衬混凝土等级为C45。其有限元模型示意图如下图3所示。

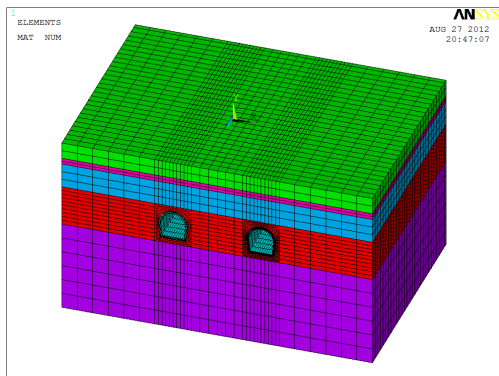


图3 有限元模型横截面示意图

在左右边界处施加无反射边界(Non-reflection),以

防止有不符合实际的反射效应;在基底处施加X、Y、Z方向固定约束;地表处为自由边界。模型尺寸按照经验取值,左右两侧及隧道下部岩石介质取为隧道跨度的四倍左右。现以该地铁隧道上部楼房与隧道结构交叉的纵向尺寸为依据,将模型的纵向尺寸的取值略大于交叉范围(约41m),取为45m。

根据地质详勘报告,隧道上方地层主要为第四系填土层(①)、粉质粘土层(⑧)、强风化花岗岩层(⑩),隧道拱部穿越地层为强风化下压带,隧道底部为中风化~微风化花岗岩。

4 列车引起振动分析

4.1 隧道结构分析

选取隧道结构不同部位处的节点,其节点选取示意图如图4所示。其速度及位移时程曲线如下所述。

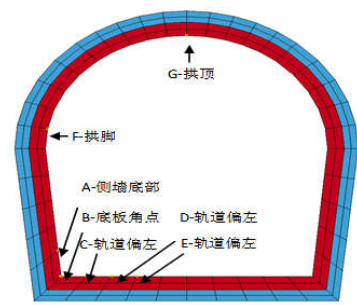


图4 节点拾取示意图

速度时程呈现出周期性特征。速度响应最大值发生在轨道处(见图5中曲线D),其峰值为0.03cm/s。可见速度响应是非常小的,结构处于微振动状态,结构安全。

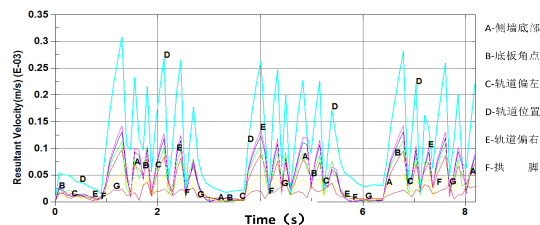


图5 隧道结构内表面不同点处速度时程曲线

如图6~7所示,拱顶拱底竖向相对位移最大值为0.19mm,拱脚横向相对位移最大值为0.15mm。铁路隧道设计变形控制值为1‰D~5‰D,这里变形远小于1‰D=5.1mm(D按照内径5.1m计算),即在列车振动荷载作用下结构变形很小,满足正常使用要求。

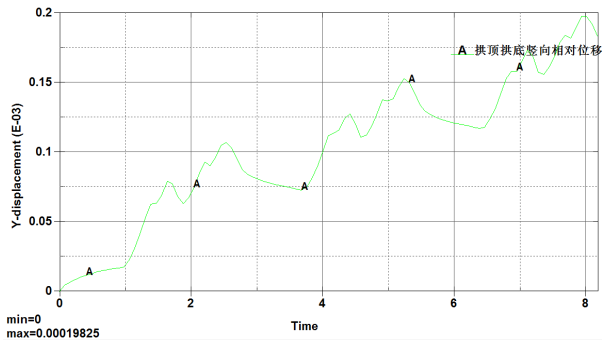


图6 拱顶拱底竖向相对位移

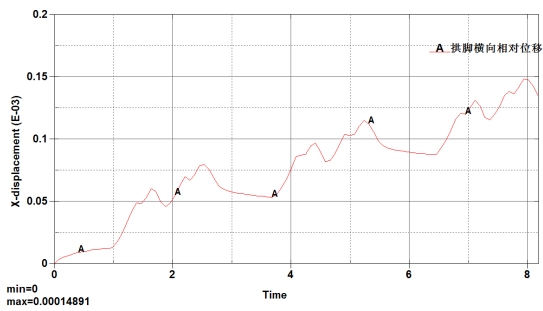


图7 拱脚横向相对位移

4.2 环境振动分析

在隧道上方的地面选取不同的节点分别进行考察,从左线拱顶正上方开始,向右线方向依次选取不同节点,详情见图8~11。

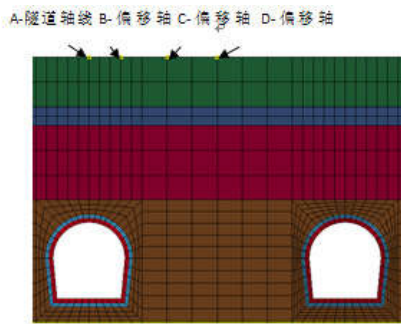


图8 地面点拾取示意图

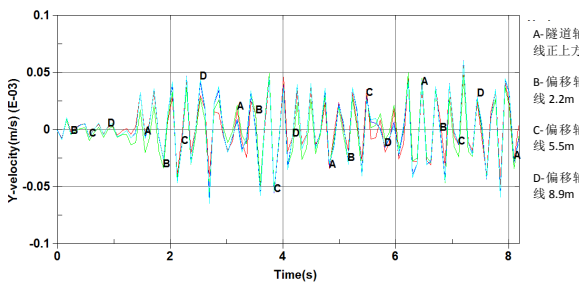


图9 竖向(Y向)速度时程曲线

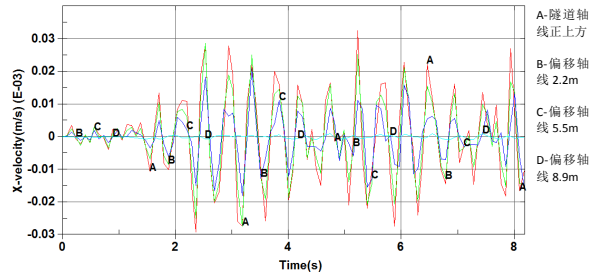


图10 水平向(X向)速度时程曲线

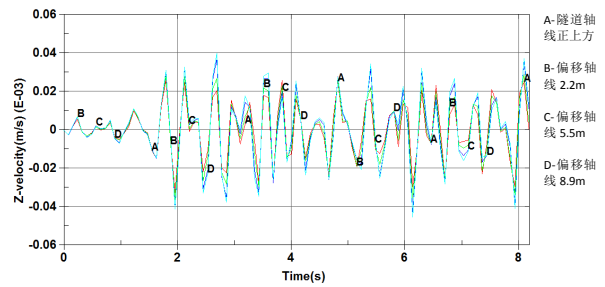


图11 横向(Z向)速度时程曲线

从地面横纵向速度时程曲线来看,速度响应最大值不超过0.15cm/s,速度振动很小,目前对于场地振动的评价除了在爆破施工中应用的GB 6722—2014《爆破安全规程》之外,尚没有其他可参考的规范是使用速度作为评价指标的,这里以GB 6722—2014《爆破安全规程》作为参考。爆破振动产生的低频率“<10Hz”中规定的速度安全限值,对于地上建筑物,安全速度范围为0.5~4cm/s不等,故可初步判定列车振动对周围建筑物并未产生危害,详情见图12~14。

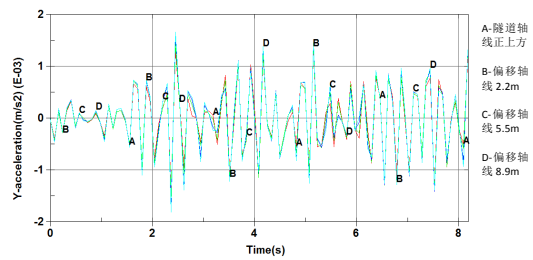


图12 地表不同点处竖向(Y向)加速度时程曲线

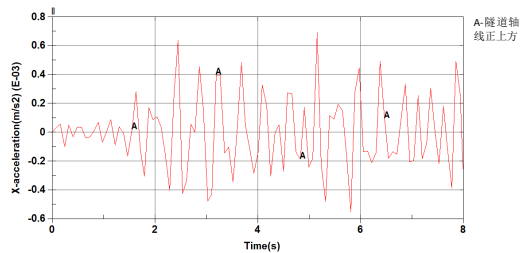


图13 横向(X向)加速度时程曲线

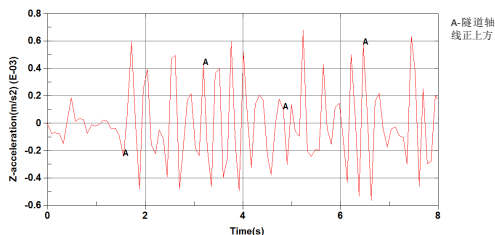


图 14 横向 (Z 向) 加速度时程曲线

分别对竖向 (Y 向) 及横向 (X、Z 向) 进行快速傅里叶变换, 提取加速度频谱曲线的数据点, 得到的计权加速度振级如表 1 所示。

表 1 地面点计权加速度振级

计权有效值 (cm/s ²)			计权加速度振级 (dB)		
X	Y	Z	X	Y	Z
0.15	0.53	0.11	43.5	54.5	40.8

根据国家规范 GB10070—88《城市区域环境振动标准》, 列车振动荷载产生的环境振动在可接受的范围内, 不会对居民及邻近建筑物产生危害^[4]。

4.3 振动效应综合分析

根据该工程勘察报告, “地震动反应谱特征周期为 0.40s”。根据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》和上部建筑物类型, 建筑自振周期采用下式计算:

$$T_1 = 0.22 + 0.35H / \sqrt[3]{B} \quad (1)$$

其中, T_1 为自振周期, 单位 s; H 为房屋的总高度, 当高度不等时取平均高度, 单位 m; B 为考虑方向的建筑物总宽度, 单位为 m。

针对本工程, 上部建筑物高度为 22.2m, 总长 28.8m, 总宽 34.2m。在长度方向上, 计算得到 $T_1=2.75s$, 即频率为 0.36Hz; 在宽度方向上, 计算得到 $T_1=2.61s$, 即频率为 0.38Hz。

根据本报告 4.2 计算结果, 列车运行引起地表竖向 (Y 向) 加速度最大值出现在 4.1Hz 时, 频率主要集中在 3.3Hz~6.0Hz 之间。根据上述分析, 不会发生共振现象。

5 结论

①拱顶拱底竖向相对位移最大值为 0.19mm, 拱脚横向相对位移最大值为 0.15mm。铁路隧道常用设计值变形控制值为 1‰ D~5‰ D, 这里变形远小于 1‰ D=5.1mm (D 按照内径 5.1m 计算), 即在列车振动荷载作用下结构变形很小, 满足正常使用要求。

②场地地震动反应谱特征周期为 0.40s, 上部建筑物在长度方向上自振频率为 0.36Hz; 在宽度方向上自振频率为 0.38Hz, 列车运行引起地表振动频率 3.3Hz~6.0Hz 之间, 不会发生共振。

③列车长期运营过程中在地表产生竖向振动振级最大值 54.5dB, 未超过国家规范 GB10070—88《城市区域环境振动标准》中对类似区域规定的加速度振级标准值, 故此, 列车振动荷载产生的环境振动在可接受的范围内, 不会对居民及邻近建筑物产生危害。

参考文献

- [1] 林浩, 杨东, 王文斌, 等. 地铁运行对建筑物及环境振动的影响[J]. 铁路技术创新, 2017(5):80-85.
- [2] 逯鹏宇, 魏志然. 震动荷载作用下地铁隧道长期沉降机制试验研究[J]. 工程勘察, 2018(5):26-30.
- [3] 王安宇. 高速铁路的减振降噪问题[J]. 铁道建筑技术, 2002(3):67-69.
- [4] 国家环境保护局. GB10070—1988 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 1988.