

地铁运行引起环境振动的评价方法

万胜国¹, 梁 晖¹, 周华杰²

(1. 武汉市公安消防局, 湖北 武汉 430021; 2. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430030)

摘 要:为了完善地铁运行引起环境振动的评价方法, 针对目前国内外地铁运行引起的环境振动的评价标准进行了比较, 重点分析了不同标准中评价方法与评价指标的异同, 指出了各自的不足以及尚需进一步研究的问题, 为国内相关标准与法规的制订与完善提供参考。

关键词:地铁; 环境振动; 评价方法; 评价指标

中图分类号: TB53; U231

文献标识码: A

0 引 言

地铁具有快捷、准时、卫生和运量大等特点, 北京、上海、广州等城市地铁的发展比其它交通设施的发展快得多, 国内在建地铁的城市还在不断增加。但是地铁运行引起的环境振动和噪声影响日益显著, 将越来越受到公众的关注, 城市交通系统规划设计中考考虑地铁对环境的影响的要求也越来越高。

地铁在国外发展较为成熟, 因此对其诱发的环境振动问题的研究也较为系统。在理论计算方面, J. A. Forrest^[1]分别将浮置板道床和轨道模拟为文克尔梁, 并建立三维隧道模型, 分析计算了周围土体的振动响应, 研究表明在特定情况下, 浮置板道床事实上有可能增强振动效应的传播。在数值模拟方面, D. Clouteau^[2]用有限元的方法去模拟隧道, 用边界元方法去计算土体, 来解决隧道—土体相互作用的动力响应问题, 并通过巴黎地铁隧道计算结果证实了这种方法的有效性。在现场实测方面, G. Degrande^[3]对时速在 20~35 km 的地铁测试列车进行了 35 组现场测试, 测点布设在隧道仰拱、隧道壁以及铁轨和距隧道 70 m 的建筑物内, 通过测试得到了土的振动特性以及轮轨不平顺等因素对振动的影响。对于地铁运行引起振动的环境影响评价, 美国交通运输部制定了《轨道交通环境评价导则》, 对振动的评价标准、评价方法等问题做了较为详尽的研究, 另外, 法国、捷克、西班牙、瑞士等国家在这方面也做了大量的测试、调查和研究工作, 都取得了一定的成果。然

而, 国内对于地铁运行引起环境的评价多以有限元数值模拟和现场实测拟合经验公式为主。谢伟平^[4-5]研究了移动荷载作用下轨道系统的动力响应, 并分析了列车荷载作用下高架桥与地面的振动。另外, 还提出了一种评定移动荷载作用下土体动力特性的新方法: 人工神经网络法。

地铁列车在轨道上行驶时, 由于车轮偏心, 车轮与道岔、钢轨的碰撞以及线路不平顺等原因, 引起车轮的振动, 经钢轨→扣件→轨枕→道床→隧道结构→围护地层传至地面及建筑物, 进而引发建筑物振动及由振动所诱发的结构二次噪声, 其传播过程如图 1 所示。关于地铁运行引起环境振动的评价能为国内地铁诱发振动评价标准的制订与完善提供参考。

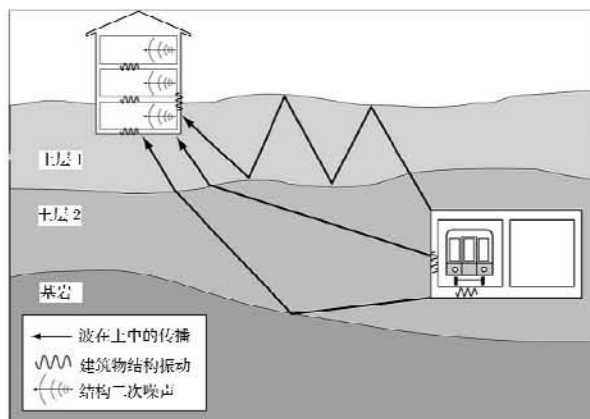


图 1 地铁运行所引发的环境振动

Fig. 1 Environmental vibration induced by subway

1 几种常见标准中的评价方法

目前评估地铁运行引起环境振动的评价方法

主要有三种: a. 实验法: 在测试现场布置测点, 测出列车通过时各测点的振动响应. b. 用类比实验建立预测公式法: 通过模拟现场进行测量, 用统计的方法得出振动响应的规律, 并得到振级衰减公式, 并应用于其他规划地铁. c. 数值分析法: 通过建立车辆—结构—土层—建筑物的二维共同作用有限元模型来分析地铁列车所引起的动力响应.

研究表明: 实验法只适合于进行局部评估, 若对整条线路进行全面评价, 工作量将是惊人的, 而且无法在规划阶段对新建地铁线路进行预测评估. 而公式法又很难全面考虑影响环境振动的诸多因素, 尤其是地质条件的差异性, 因此都具有很大的局限性. 数值分析法一般是在现场试验的基础上, 导出列车振动荷载的数值表达式, 将其加在轨道节点的位置上, 采用弹塑性本构关系和摩尔—库伦屈服准则, 用有限元法或有限元和无限元耦合的方法, 在时域内对地铁区间隧道及周围土体这一结构复合系统进行动力分析, 得出地面某控制点的振动分量值, 虽然该方法荷载比较客观准确, 计算单元少, 但该模型实际上假定地铁列车以同样的相位沿纵向无限长振动, 因此过高的模拟了列车的振动响应.

2 几种常见标准中的评价指标

环境振动对周围建筑内居民或精密仪器设备影响可以采用加速度与速度来评价, 而一般不用位移评价. 国内一般采用加速度指标来评价. 按环境振动标准, 地铁等轨道交通振动的环境影响应属冲击振动. 冲击振动应按每段取 1 s 的最大振级来评价, 但对地铁情况, 作用时间远大于 1 s, 与标准中的冲击振动又有不同特点, 按地铁作用时段的振级来评价才较为合理, 即取一列地铁列车经过时段来评价. 例如, 上海市地铁所采用的德国车辆六节车厢, 按正常行驶速度运行, 经过一点的时间一般为 8 s 左右, 可按 8 s 左右的地铁振动时段的振级加以评价. 现有环境振动标准虽然对各种振动有所规定, 但由于国内环境振动的研究不够深入, 规定很不具体, 还应按具体情况作相应的考虑, 规定也需要随研究的深入而作相应的修正.

2.1 国际标准化组织 ISO2631

ISO2631(全身振动暴露度评价指南)用于评价交通工具和机器附近的振动. ISO2631 标准适用的振动频率是 1~80 Hz, 该标准从振动的强度、振动的频率范围、振动的方向以及振动的暴露时间几个方面进行了阐述, 给出了保证人体在振动环境中的舒适性界限、疲劳功效界限和安全健康

界限三个公认的准则. 这个标准同时建议建筑物可接受的振动限值在振感阈值附近, 为了评价在频率为 1~80 Hz 振动作用下建筑物的舒适度, ISO 做了多次努力, 并发布了许多标准, 所有这些标准都对 X、Y、Z 轴使用了 ISO 定义的频率计权, 并给出了舒适度曲线用于对舒适度的评价. ISO2631 也是现在国际上普遍采用的环境振动评价方法.

由于环境振动评价的频率范围为 1~80 Hz, 影响范围远比地震作用时的范围宽, 因而不能简单的如地震作用那样主要考虑加速度峰值. 对于环境振动, 加速度频谱分布的宽与窄以及主频率的高与低对评价指标有很大影响, 如仅考虑加速度时程的峰值容易导致错误的结论. 因此, 环境振动考虑加速度或速度在频域的分布而采用考虑全身振动不同频率计权修正后的振级来评价, 可按式(1)计算(单位为 dB):

$$VL = 20\lg(a_c/a_{ref}) \quad (1)$$

式(1)中, a_c 为按 ISO2631 规定的全身振动不同频率计权因子修正后得到的振动加速度 (m/s^2), 按式(2)计算:

$$a_c = \sum a_i^2 \times 10^{\frac{C_n}{10}} \quad (2)$$

式(2)中: a_i 为第 i 个中心频率的加速度有效值 (m/s^2), 该中心频率为 1~80 Hz 的倍频程频率, 若按住宅振动限制标准, 则按三分之一倍频程计算; C_n 为按 ISO2631 规定的全身振动不同频率计权的修正值 (dB); a_{ref} 为基准加速度, 取 $a_{ref} = 10^{-6} m/s^2$

上述振动加速度有效值即为加速度的均方值, 按式(3)计算:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2 dt} \quad (3)$$

式(3)中, T 为时段长, a 为任一时刻的加速度. 对幅值为 A 的单一正弦波, 则加速度有效值为 $a_{rms} = A/\sqrt{2}$.

对于离散加速度时程, 则用频域幅值谱各离散频率的加速度有效值进行计算, 前述的 a_i 即采用第 i 个中心频率所在的频带内所有 m 个离散频率点的加速度有效值按(4)式求得

$$a_i = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_m^2} \quad (4)$$

根据采用倍频程和三分之一倍频程的不同, 振级也有所不同, 计算表明二者相差很小, 对于地铁环境振动情况在 1 dB 以下. 仅评价垂向振动时振级称为 z 振级, 符号为 VL_z .

另外, 在评价不同频率的振动大小时, 常采用

振动加速度级(VAL),其计算公式同式(1),但其中的 a_c 为某中心频率的振动加速度有效值,按式(4)计算,但不考虑不同频率的计权修正。

2.2 美国标准

《轨道交通环境影响评价导则》中对环境振动的影响,采取列车通过过程中的最大示数作为评价量。由于不同的交通形式所引起振动的频繁程度不同,所以标准中除了对敏感建筑进行详细分类外,还根据列车运行的间隔时间,将其分为“频繁事件”、“偶然事件”和“非经常事件”。对于由地铁引起的环境振动的评价,《轨道交通环境影响评价导则》分为三部分:区域审查、一般评价和详细分析。敏感建筑的分类如下:

I类 高敏感类建筑:包括对振动相对敏感的科研生产基地、拥有对振动敏感仪器的医务室、大学实验室等,而敏感程度则取决于仪器受影响的程度,这些仪器包括电子显微镜、外壳手术器具高分辨率石印仪器等。

II类 居住区:所有的供人休息的区域,除居民住宅还包括旅馆、医院等。

III类 其他机构诸如学校、教堂、办公室等。其振动限制见表1。

表1 各类敏感建筑振级标准值(振动速度级)

Table 1 Various types of sensitive construction vibration standard value (vibration velocity level)

适用地带	频繁事件	偶然事件	非经常事件
I类	65 VdB	65 VdB	65 VdB
II类	72 VdB	75 VdB	80 VdB
III类	75 VdB	78 VdB	83 VdB

另外,《轨道交通环境影响评价导则》中对于诸如音乐大厅、电视演播室、剧院等对振动较敏感的建筑制定了相应的振动标准,如表2所示。

表2 音乐大厅等敏感建筑振级标准值(振动速度级)

Table 2 Music hall and other sensitive construction vibration standard value (vibration velocity level)

建筑物种类	频繁事件	偶然事件
音乐大厅	65 VdB	65 VdB
电视演播室	65 VdB	65 VdB
录音棚	65 VdB	65 VdB
会堂、礼堂	72 VdB	80 VdB
剧院	72 VdB	80 VdB

2.3 日本标准

该标准采用了ISO2631的频率计权,并表达为如下形式:

$$dB=20\lg(a/a_0) \quad (5)$$

其中 a 是测量得到的加速度,而 a_0 是参考加速度,振动测量时也需要进行频率计权。

日本标准给出的振动限值按照振源来说可划

分为3类,即工厂、施工设备和交通。工厂给安静的住宅区造成的振动,其限值为60~65 dB,对于工业与商业区为65~70 dB。这些限值在夜间还要低,一般要减少5 dB。对于施工引起的振动限值为70或75 dB。对于道路交通,在住宅区的限值是65 dB,工业与商业区是70 dB,夜间要减少5 dB。偶尔超过这些限值的振动水平也是允许的,但是持续时间不能很长。

2.4 中国标准(GB 10070-88)

中国标准(GB 10070-88)仅仅给出了Z轴振动的振动舒适度标准,该标准采用了ISO2631给出的频率计权,类似于日本标准,该标准采用了分贝坐位评价指标,即

$$VAL=20\lg(a/a_0) \quad (6)$$

其中 a_0 是参考加速度,取值为 $1\times 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$ 。

文献[6]对振动标准值及适用地带范围规定如表3。

表3 城市各类区域铅垂向Z振级标准值

Table 3 Vertical Z vibration level standard value in urban various area

适用地带范围	昼间	夜间
特殊住宅区	65 dB	65 dB
居民、文教区	70 dB	67 dB
混合区、商业中心区	75 dB	72 dB
工业集中区	75 dB	72 dB
交通干线道路两侧	75 dB	72 dB
铁路干线两侧	80 dB	80 dB

由此可知,由于采取的评价指标不同,故振动标准值存在差异,但仅就城市各区域的划分而言,《轨道交通环境影响评价导则》相对于国内规范更趋于合理,也更加细化。比如对于居住区,《轨道交通环境影响评价导则》并未对其进行区分,不管是一般的住宅,还是旅馆、医院或是处于商业区的居住地,只要是为人们提供休息睡眠之地便将其化为一类,采用同样的评价标准,而国内规范对“特殊住宅区”和“铁路干线两侧”的住宅区所规定的振动标准值相差15 dB,当然这也与我国的实际国情有关,但是随着各方面制度的完善,标准也将更趋于人性化。

3 结 语

本文针对目前国内外地铁运行引起的环境振动的评价标准进行了比较,重点分析了不同标准中评价方法与评价指标的异同,指出了各自的不足以及尚需进一步研究的问题,为国内相关标准与法规的制订与完善提供参考。研究表明任何一种评价方法都有其适用性以及局限性,《轨道交通

环境影响评价导则》中的评价方法也存在一定的问题,如规划地铁的测试过程中无法考虑隧道的衰减作用,使得在试验细节上尚需作进一步的修正,不过消除了地质条件这一环境振动传播过程中重要因素的影响,使得既有地铁的测试数据得到广泛地应用.关于地铁运行引起环境振动的评价方法研究,由于受到客观条件的限制,还无法通过现场试验去验证方法的有效性,需作进一步的研究.

参考文献:

- [1] Forrest J A. Ground vibration generated by trains in underground tunnels [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294: 706-736
- [2] Clouteau D. Freefield vibrations due to dynamic loading on a tunnel embedded in a stratified medium [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283: 173-199.
- [3] Degrande G. A numerical model for ground-borne vibrations from underground railway traffic based on a periodic finite element boundary element formulation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293: 645-666.
- [4] Xie Weiping, Sun Honggang, Yu Yanli. The Dynamic Response of Rail System by Moving Loads [A]. Haiyan Hu. Proceedings of The 5th International Conference on Vibration Engineering [C]. Beijing: China Aviation Industry Press, 2002, 331-335.
- [5] Xie Weiping, Zhang Liangtao, Yu Yanli. A New Estimation Method of the Dynamic Properties of Soil under the Action of Moving Load Using Artificial Neural Networks [A]. Ditao Niu, Ji Ping Ru. Proceedings of The 8th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts [C]. Beijing: Science Press, 2004, 1234-1239.
- [6] GB 10070-88 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.

Study on evaluation approach of subway-induced environmental vibration

WAN Sheng-guo¹, LIANG Hui¹, ZHOU Hua-jie²

(1. Wuhan Municipal Fire Department, Wuhan 430020, China;

2. Wuhan Metro Group CO., LTD. Wuhan 430030, China)

Abstract: In order to improve the evaluation approach of subway-induced environmental vibration, the evaluation criteria of environmental vibration induced by subway both at home and abroad are compared in the paper. The emphases are paid on their similarities and differences, and their deficiencies and the problems unsolved were pointed out. The research work in the paper can provide reference to formulate and improve domestic standards and regulations.

Key words: subway; environmental vibration; evaluation approach; evaluation indexes

本文编辑: 萧 宁