

轨道交通引起的环境振动问题^{*}

夏 禾, 曹艳梅

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 随着社会经济的发展和人民生活质量的提高, 振动对环境的影响已经引起了越来越多的关注。系统地综述了国内外关于轨道交通引起的环境振动问题的研究状况, 分析了振动对人们工作和生活的影响, 振动产生的原因, 列车速度影响, 振动的持续时间、强度分布等特点, 以及地面铁路、高架轻轨、地铁列车等轨道交通系统引起的周围环境及建筑物振动的基本规律。

关键词: 轨道交通; 振动; 环境; 建筑物

中图分类号: TU311.3 文献标识码: A 文章编号: 1672-7029(2004)01-0044-08

Problem of railway traffic induced vibrations of environments

XIA He, CAO Yan-mei

(School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the development of social economy and the raise of people's living quality, the problem of environment vibrations has been more and more noticed. The researches of railway traffic induced environmental vibrations in China and abroad are summarized. The influences of vibrations on people's working and living, the generation and propagation characteristics of vibrations, and the basic laws of ground, underground and viaduct railway traffic induced ground vibrations and their influences on surrounding buildings are analyzed.

Key words: railway traffic; vibration; environment; building

随着现代工业的迅速发展、城市规模的日益扩大, 振动对大都市生活和工作环境的影响引起了人们的普遍关注。国际上已把振动列为七大环境公害之一, 并开始着手研究振动污染规律、振动产生的原因、传播路径与控制方法以及对人体的危害等问题。

1 轨道交通引起的环境振动问题

所谓振动公害, 是指人类活动引起的地面、建筑物、交通车辆等振动对人的生活和工作环境的影响、对人体健康的影响、对建筑物安全的影响以及对精密仪器正常使用的影响等。据有关国家统计, 除工厂、企业和建筑施工之外, 交通系统引起的环

境振动问题(主要是建筑物的振动)是公众反映中最强烈的^[1], 约占总投诉率的14%, 如图1所示。

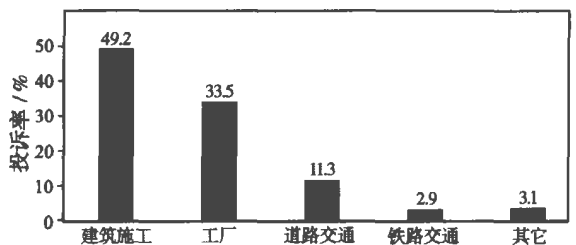


图1 环境振动的公众投诉率(日本)

Fig. 1 Public Complaint on environmental vibrations (Japan)

随着城市的发展, 对城市交通系统规划设计中考虑环境影响的要求越来越高。这是因为, 过去城

* 收稿日期: 2003-12-04

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8042017)

作者简介: 夏 禾(1951-), 男, 北京人, 北京交通大学教授, 博士生导师, 从事桥梁与结构动力学研究

市建筑群相对稀疏, 交通车辆引起的振动对周围环境的影响未成为人们关注的环境问题。而现在, 随着城市建设的迅猛发展, 多层的高架道路、地下铁道、轻轨交通正日益形成一个立体空间交通体系, 从地下、地面和空中逐步深入到城市中密集的居民点、商业中心和工业区。如日本东京以及我国北京、上海、广州等大城市, 市内的立体交通道路很多已达到 5 至 7 层之多, 如图 2 所示, 而离建筑物的最短距离则小到只有几米, 甚至紧挨建筑物, 如图 3 所示。



图 2 日本东京的多层立体交通道路
Fig. 2 Multi-level viaducts in Tokyo

环境振动对激光、电子显微镜、电子天平的操作、外科手术器具、半导体集成电路的制作等也有很大的影响, 它会使这些精密仪器和设备产生读数不准、精度下降, 使用寿命缩短, 甚至不能正常工作。图 6(a)、(b)所示是 150 000 倍率的电子显微镜在振动环境下有无受到振动影响时产生影象的比较^[1]。可见, 为保证精密仪器设备和精加工机床工作的可靠性, 周围环境振动的影响是不容忽视的。



图 4 捷克古教堂因交通振动产生的裂缝
Fig. 4 Vibration induced crack of an old church near road

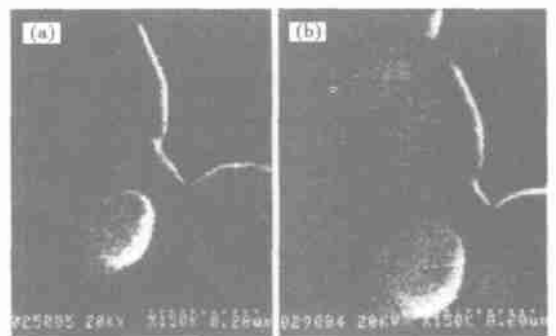


图 3 高架桥与建筑物紧挨在一起(广州)
Fig. 3 Viaduct bridge contact with a building (Guangzhou)



图 5 铁路附近室内家具因振动产生的错位
Fig. 5 Vibration induced furniture shift in a room near railway

交通车辆引起的结构振动通过周围地层向外传播, 进一步诱发邻近建筑物(包括室内家具等)的 2 次振动和噪声, 对建筑物的结构安全及其居民的工作和日常生活产生很大的影响。在捷克, 繁忙的公路或轨道交通线附近的某些砖石结构的古教堂因车辆通过时引起振动而产生裂缝如图 4 所示。甚至发生了由于裂缝不断扩大导致建筑物倒塌的事例。在北京, 西直门附近距铁路约 150 m 处一座 5 层楼内的居民, 当列车通过时可感到室内有较强的振动, 门窗和家具的玻璃发出噪声, 一段时间后室内家具由于振动而发生了错位^[2], 如图 5 所示。



(a) 未受振动影响的影象; (b) 受振动影响的影象
图 6 振动对电子显微镜影象的影响

Fig. 6 Effect of vibration on electronic microscope images

环境振动一般不会对人体直接造成伤害,但它会干扰人们的日常生活,使人感到不适和心烦,甚至影响人们的睡眠、休息和学习。试验研究表明:振动强度愈高,对人们入睡和睡眠深度的影响愈大;当振动为 60 dB 时,一般人刚刚可以感觉到振动,它并不影响人们的睡眠,但对较敏感的人或患病者则会产生影响;当振动达到 65 dB 时,对睡眠有轻微影响;达到 69 dB 时,所有轻微睡眠的人将被惊醒;达到 74 dB 时,除酣睡的人,其他人将惊醒;达到 79 dB 时,所有的人都将惊醒。可见振动对居住在铁路线周围的居民影响是很大的。

一方面是振动日益增大,另一方面,人们对生活质量的要求也越来越高,即使对同样水平的振动,在过去可能不是问题,而现在却越来越多地引起了公众的强烈反应。这些都对交通系统引起的结构振动及其对周围环境影响的研究提出了新的要求,引起了各国研究人员的高度重视^[1-20]。

日本是振动污染最严重的国家之一,因而对环境振动问题极为重视。在其“公害对策基本法”中,明确振动为七大环境公害之一,规定必须采取有效措施加以限制。在“限制振动法”中,对交通振动提出了特别要求,以保全生活环境和保护人民的健康。日本通产省环境局、日本噪声控制学会组织制订了有关环境振动公害控制及法规的专门文献。江岛淳和青木一郎分别就交通车辆引起的结构振动的发生机理、振动的传播规律及其对周围居民的影响进行了研究,并提出了振动预测方法。日本铁道综合技术研究所建立了专用振动台和人体振动分析模型,研究了不同频率、强度和持续时间的振动对人体的影响。T. Fujikake、吉冈修等就新干线高速列车对环境振动的影响进行了现场测试,分析了车辆、轨道、桥梁、地面等不同部位的振动特点,并研究了不同类型的隔振屏障的隔振效果^[3-5]。

在美国,G. P. Wilson 等针对铁路车辆引起的噪声和振动,提出了通过改善轨道结构形式(例如采用浮置板式道床)及改革铁路车辆转向架构造以减少轮轨接触力,从而降低地铁车辆引起的结构噪声和振动的建议。L. G. Kurzweil 等则研究了地铁列车的振动在不同地层中的传播路径、衰减特性以及邻近建筑物的 2 次振动和噪声问题^[6-7]。

面对公众的强烈反映,英国铁路管理局研究发展部技术中心对铁路车辆引起的地面振动进行了测试,主要就行车速度、激振频率和轨道结构参数

的相关关系以及共振现象等进行了实验研究。

在欧洲的许多国家,高速铁路网的建设使得人们对交通引起的环境振动问题产生了极大关注和研究热潮。在比利时,部分高速铁路线路是在既有铁路上改造的,往往穿过一些城镇,有些新建的站线甚至紧靠着建筑物的基础^[1],如图 7 所示。

在安特卫普车站,高速列车将从地下通过,产生与地下铁道类似的振动影响。为此,鲁汶大学 G. De Roeck 和 G. Degrande 教授等与比利时铁路公司 SNCB 合作,在布鲁塞尔至巴黎之间高速铁路线上进行了试验,测试和分析了高速列车通过时附近地面振动的分布规律。他们还通过汽车冲击振动试验和数值模拟的方法研究了振源特性与地面振动的传递函数关系^[8]。



图 7 穿过城镇的高速铁路(比利时)

Fig. 7 High speed railway running through a town (Belgium)

轨道车辆引起的结构和地面振动是城市交通规划中的一个重要问题,由其进一步引发的周边建筑物振动以及相应的振动控制和减振措施,在规划设计的最初阶段就应加以考虑。为此,文献[10]报道了一种基于脉冲激励和测试分析的诊断测试方法,来预测市区铁路线附近地面和建筑物的振动水平,并通过不同测点数据的传递函数关系分析研究了振动的传播规律。文献[11, 12]报道对隔振沟、板桩墙、阻波障(WIB, Wave Impeding Barrier)等隔振措施进行的试验研究及取得的成果。

在国内,虽然大城市发展较晚,但随着现代化的进程,轨道交通大规模发展的趋势是极为迅速的。目前已经拥有或正在建设地下铁道的城市越来越多,不少城市还在筹建高架轻轨交通系统。近年来已经出现了有关轨道交通引起的振动可能影响环境和周边建筑物内居民生活、工作的公众反映的预测,如西直门至颐和园快速轨道交通系统可能对附近文化和科研机构产生的振动影响、地铁南北中轴线可能对故宫等古建筑产生的振动影响,拟建

的京沪高速铁路可能产生的高速列车对苏州虎丘塔的振动影响等。为此,北京市地铁总公司、北京市环境保护局、北方交通大学等已经通过理论分析、数值模拟和现场试验(图8)的方法进行研究,发表了有关普通铁路、地铁、高架轻轨列车作用下的地面、隧道及高架桥梁的振动及其对周围环境和建筑物影响的研究成果^[13-17]。在广州和深圳,包含振动影响在内的环境评价已经成为新建轨道交通系统规划设计中必不可少的程序。



图8 列车对环境振动影响的现场试验

Fig. 8 Field test on train induced environmental vibration

在台湾,台北至高雄之间的高速铁路对台湾南部科学园区可能产生的振动影响已经引起了各界人士的广泛关注。台湾大学的杨永斌教授、成功大学的朱圣浩教授等采用数值分析的方法对高速铁路的环境振动影响进行了系统的研究和预测,并提出了降低环境振动影响的措施^[18]。

2 轨道交通引起的环境振动特点

2.1 环境振动的产生、传播和影响因素

轨道交通对环境和周围建筑物的影响可通过图9的示意加以说明:由运行车辆对轨道的冲击作用产生振动,通过结构(路基、桥梁墩台及其基础、隧道基础和衬砌等)传递到周围的地层,并经过地层向四周传播,激励附近地下结构或地面建筑物产生振动并进一步诱发室内结构和家具的二次振动和噪声,从而对建筑物的结构安全以及建筑物内人们的工作和生活产生影响。

对于地面铁路,主要影响因素有:车辆类型、载重、行车速度、铁路轨道的不平顺、车轮的不平顺、钢轨接头、轨道的结构特性、路基的弹性特性等。轨道养护状态对振动的影响也很大,一般振动大的轨道,经过养护其振动可降低约5~10 dB。

对于高架轨道系统,主要影响因素有:列车速度、车辆重量、桥上轨道的特性、桥梁型式和基础类型、桥梁的跨度、刚度、挠度、桥梁支座的类型和减振性能、桥梁接缝、路桥过渡段的刚度不一致性等,此外列车与桥梁的相互作用也会加大振动的作用。

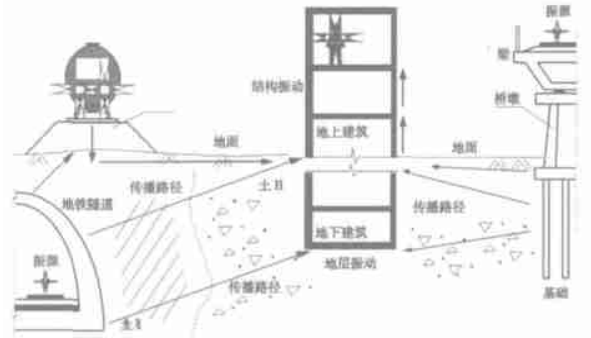


图9 轨道交通系统对环境振动的影响

Fig. 9 Influence of railway induced vibration on environment

对于地下铁道,主要影响因素有:列车速度、车辆重量、隧道的埋置深度、隧道基础和衬砌结构类型、轨道类型、是否采用了隔振措施等,此外列车与轨道的相互作用也会加大振动作用。

2.2 轨道交通引起的环境振动的特点

2.2.1 持续特点

对于普通的双线铁路,列车运行的间隔可以短至5~10 min,每次列车通过的持续时间根据车速和列车长度不同可长至2~3 min。因此,列车引起的环境振动持续时间可长达总时间的1/5~1/3。

高速铁路因列车行驶而产生的振动是间歇性的,每次列车振动持续的时间比较短。日本新干线列车通过时的标准振动级表示为梯形特性曲线,当列车通过速度为200 km/h时,峰值的持续时间约为7 s左右,而具有这样峰值的振动每经4~8 min间隔发生1次,其影响也是可观的。

根据北京地铁的调查:一列地铁列车通过时,在地面建筑物上引起的振动持续时间约为10 s钟。在一条地铁线路上,高峰时,2个方向1 h内可通过30对列车,或更多一些。因而振动作用的持续时间,可达到地铁总工作时间的15%~20%,其对环境产生的振动影响是不容忽视的。

2.2.2 强度分布特点

轨道交通系统产生的振动类似于一般振动,也是以3种波的形式传播,即剪切波,压缩波和表面波。实测结果表明:地下2 m深土层的振动加速度为地表的20%~50%;4 m深时则减少到10%~30%。所以,在车辆运行产生的环境振动中,表面

波传播占主要地位。

由于能量的扩散和土层对振动能量的吸收,车辆引起的振动强度在其传播过程中将有所衰减。不同类型的振源,不同的振动方向,不同的传播方向以及不同的土介质,对振动的衰减是有区别的。

就地面振动随距离的衰减而言,距轨道越近,同一列车引起的地面振动就越大,反之则越小。一些文献认为列车运行所产生的地面振动随至线路距离增加而有较大的衰减是一般规律。

对于轨道交通系统,振动通过桥墩向地层传播可看作点振源,而通过道床直接传播则看作线振源。理论分析结果表明:环境振动的强度随至振源的距离而衰减。对点振源,可表示成

$$U_r = U_0 r^{-n} e^{-2\pi f \xi r / V} \quad (1)$$

式中 U_0 为振源附近基点的振幅; U_r 为到振源距离为 r 的地点的振幅; ξ 为土层介质的阻尼比; f 为振动的频率, V 为传播速度, n 为系数,对表面波取 $n=0.5$,对无限半空间的实体波取 $n=2$ 。

而对线振源,可表示成

$$A_{rz} = \frac{1}{2} K_0 r^{-k_z} e^{-\alpha_z r} v^{3/4} \quad (2)$$

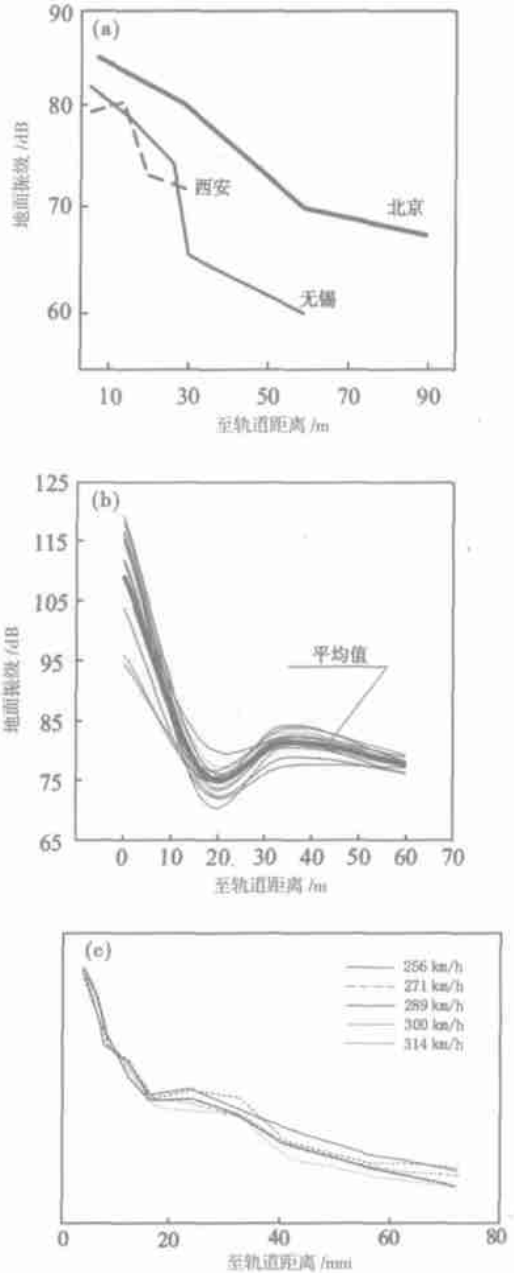
式中 A_{rz} 为距轨道中心 r (m) 处的振幅; v 为列车运行速度,单位为 km/h; K_0 为不同土类的振幅系数; K_z 为振动在传播过程中的综合衰减系数,对垂直振动 $K_z=0.75$,对水平振动 $K_z=0.3$; α_z 为土层对振动能量的吸收系数,其取值见文献[2]。

振动强度的变化还与地层的密度有密切关系,一般土的粘弹性系数越大,衰减越快;密度越高,振动的衰减就越慢。

根据很多城市的调查,不少结果符合这些规律。图 10(a)所示是在我国几个城市的调查结果,该图表明铁路车辆引起的环境振动水平较高。另据铁路部门的实测^[14],距线路中心 30 m 附近的地面振动可达 80 dB,而随着距离的增加,强度迅速衰减。

但也有研究得出了不同的结果。如文献[13]报道在沈阳测试列车通过时地面振动加速度随距离的变化规律,结果如图 10(b)所示。可以发现地面振动分别在距线路 30~50 m 处出现了增大的现象,且这一结果与数值分析的结果相吻合^[2]。

在比利时,G. Degrande 等对布鲁塞尔—巴黎之间的高速铁路进行了环境振动测试,在列车速度为 256~314 km/h 的情况下,也得到了同样的规律^[8],其振动加速度反弹增大区约在距线路 20~40 m 的范围,如图 10(c)所示。



(a) 国内几座城市; (b) 沈阳铁路; (c) 巴黎—布鲁塞尔高速铁路

图 10 振动强度与距线路距离的分布关系

Fig. 10 Distribution of ground vibration vs. distance to track

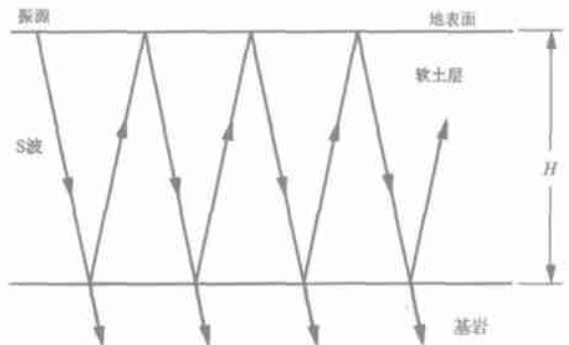


图 11 振动波在地表层的重复反射

Fig. 11 Reflections of vibration wave between soil strata

实际上若仔细观察图 10(a), 也会发现类似的反弹现象, 说明该现象具有一定的普遍性。有研究认为这种现象是由 S 波在基岩(坚硬层)与地表之间的(软)土层中重复反射而形成的, 如图 11 所示。反弹增大区的位置与波速、基岩深度以及土层的性质有关, 而公式(1)和(2)未能反映出这一规律。

2.2.3 列车速度的影响

列车引起的地面振动一般随车速的提高而增大, 从图 12 可以看出这种规律。在西班牙, G. Volberg 根据对 3 种不同场地的测试结果, 回归出振动级与列车速度的关系为^[19]

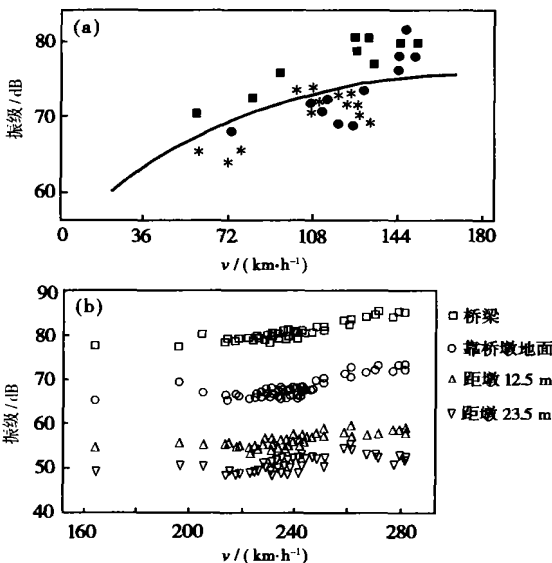
$$L_v = 64 + 20 \lg(v/40) \quad (3)$$

式中 v 为车速, km/h; L_v 为振动速度级, 参考基准速度为 5×10^{-8} m/s。

文献[20]报道了对新干线的桥梁及其周围地面的振动进行的测试, 结果表明: 在高速列车作用下, 桥梁和附近地面不同测点的振动加速度都是随车速的提高而增大, 在 160~280 km/h 的车速范围内, 振动强度可相差 5~8 dB, 见图 12(b), 其经验公式为

$$L_v = 10n \lg(v/v_0) + L_{v_0} \quad (4)$$

式中 v_0 为参考车速, km/h; L_{v_0} 为参考车速下的平均振级, n 是根据试验数据确定的系数, 反映车速对振级大小的影响, 取值范围为 1.5~3.5。



(a) - 西班牙的测试结果; (b) - 日本新干线的测试结果

图 12 振动强度与车速的分布关系

Fig. 12 Distribution of ground vibration vs. distance to track

速度有关: 车速越高, 振动干扰越强(有的文献认为列车速度每提高 1 倍, 隧道和地面的振动增加 4~6 dB), 影响范围越大。根据北京、天津地铁的实测结果, 对于整体道床、弹性轨道扣件的轨道, 在 20~100 km/h 的车速范围时, 隧道结构的垂向加速度可按式估算:

$$L_v = 67 + 20 \lg(v/65) + \Delta L \quad (5)$$

式中 v 为车速, km/h; ΔL 为不同轮轨条件下的修正值: 对于无缝线路、车轮圆整、轮轨表面平滑时, $\Delta L=0$, 如果轮轨表面不平滑, 则 $\Delta L=5 \sim 11$ dB, 如果是短轨、车轮不圆整, 则 $\Delta L=10 \sim 22$ dB。

3 常见轨道交通系统的振动特点

3.1 高架轨道桥梁系统的环境振动特点

除了上述的一般规律外, 高架轨道桥梁系统引起的环境振动还有如下特点:

1) 高架桥线路与路基线路相比, 环境振动将大幅度降低, 距线路中心线 30 m 处的振动强度可降低 5~10 dB。

2) 桥梁基础类型对地面振动的影响很大。采用桩基时, 由列车运行引起地面振动的位移、速度、加速度值均比采用平基时小许多, 且用桩基时地面振动随距线路距离的增加而衰减的速度也较平基时大。而且由于采用了不同的桥梁基础, 沿线建筑不同楼层的振动响应也有所不同, 采用浅平基础时, 高层的响应比低楼层的剧烈, 采用桩基时各楼层的差别就小得多^[2]。

3) 图 13 所示是日本新干线对轨道—桥梁—桥墩—地面系统的测试结果^[20]: 钢轨的振动高达 90 dB, 到桥墩处就已经衰减了约 20 dB; 地面振动随距离衰减的规律也很明显: 从频率特征上看, 对不同的测点, 均以 10~20 Hz 左右的频率比较突出。

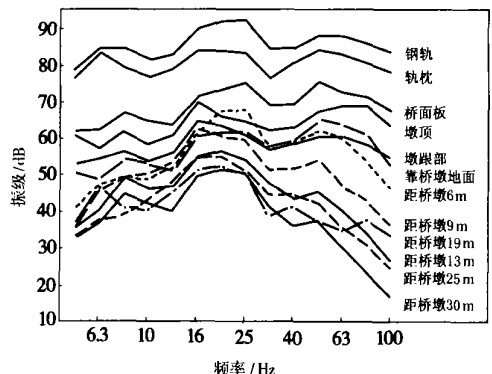


图 13 日本新干线桥梁及地面振动的测试结果

Fig. 13 Measured accelerations of Shinkansen bridge

地铁振动影响的强度和范围也与列车通过的

3.2 地下铁道环境振动特点

对于地铁列车的振动效应,除了通过现场实测了解其对环境的振动影响以外,文献[16]作者根据实测轨道加速度得到了列车荷载的模拟数据表达式,进而采用有限元法分析了隧道和周围土体的振动特性;文献[17]作者也通过建立系统动力分析模型的方法对地铁列车引起的环境振动及振动波的传播规律进行了研究。

图14所示是文献[17]作者采用计算机模拟方法得到的地铁列车引起的地面振动随距离的分布,很容易看出,在距隧道中心线30~40m的地面为加速度的局部放大区。文中还给出了分频段的加速度分布:对于1~3Hz的低频振动,尽管幅值大小不同,都在0m、36m和60m附近出现了放大区;对于5~6Hz的中频,只有0m和30m2个放大区,距离再大时则迅速衰减;对8Hz以上的高频加速度则随距离的增加而单调衰减。北京地铁总公司曾就地铁列车对环境的振动影响进行过实测,得到了与上述分布规律相同的结果。

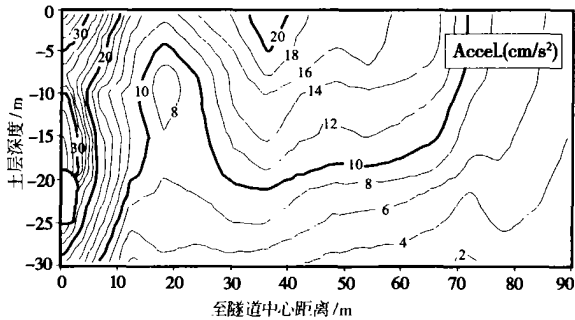


图14 振动加速度在地层中的分布

Fig. 14 Acceleration distribution in surrounding stratum

有调查表明:地铁列车在隧道内高速运行时,距轨道水平距离1.5m处,地面振级平均值为81dB,而24m处为71.6dB。地铁振动影响的范围在很大程度上还取决于隧道的埋深,埋深越深影响范围越小。隧道的结构类型和衬砌厚度对于地铁列车引起的振动有很大的影响。表1给出了不同类型的隧道相对振级,当隧道衬砌的厚度增加1倍,其振级可降低5~18dB。

表1 隧道类型对振动强度的影响

Table 1 Influence of tunnel type on ground vibration

隧道类型	铸铁或钢衬砌单孔隧道	混凝土单孔(单箱)隧道	双箱隧道	三箱隧道	车站
相对振级	+4 dB	+2 dB	0 dB	-2 dB	-4 dB

根据文献[1]的回归分析,地铁列车引起的地面振动可以用下面的表达式估计:

对圆形隧道

$$L_{V1} = K_1 - 12 \lg L_1 + 25 \lg \frac{v}{50} - 24 \lg \frac{W_1}{30} + X \quad (6)$$

对箱形隧道

$$L_{V2} = K_2 - 16 \lg L_2 + 25 \lg \frac{v}{50} - 24 \lg \frac{W_2}{30} + X \quad (7)$$

式中 L_{V1} 、 L_{V2} 为地面预测点的垂直振动振级(峰值振级的平均值, dB); L_1 、 L_2 分别为圆形隧道和箱形隧道衬砌边缘至地面预测点的最短距离, m; v 为列车速度, km/h; W_1 、 W_2 为隧道的重量, t/m; X 是车辆重量等其它因素的修正值,例如对小型车辆, $X = -5$ dB; K_1 、 K_2 为不同轨道构造的基本振级, dB,取值见表2所列。

表2 地铁轨道的构造参数

Table 2 Structure parameters of metro track

轨道构造参数	混凝土道床		道碴道床
	直接连结	减振轨枕	
K_1 /dB	63	53	56
K_2 /dB	74	64	67

3.3 轨道交通对附近建筑物的振动影响特点

随距离增大而振动强度减弱的规律也适用于沿交通线附近的建筑。某城市地铁车辆段列车在建筑物地面层以15~25km/h的速度通过时,第3层楼板的实测振动竟达85dB(图15)。在地面振动的传播过程中,铅垂方向的衰减要慢于水平方向,因而沿线建筑物内铅垂方向的振动将大于水平方向的振动。实测结果表明:楼房的垂向振动一般大于水平方向十几个分贝^[4],因此在评价楼房受铁路环境振动的影响时,可以铅垂方向振动为主。

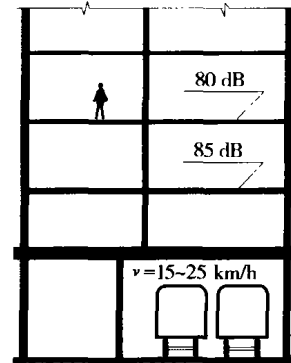


图15 某城市地铁车辆段的振动

Fig. 15 Vibration of building induced by subway trains

就不同楼层高度而言, 一般来说, 对于低层建筑, 特别是在 4 层以下, 随着楼层的增高, 振动的强度有增大的趋势。沈阳、北京、西安等地对 4 座 3~5 层楼房的测试结果表明: 在不同的距离上, 3~5 层的振动强度较 1 层约高 3~5 dB(图 16)。

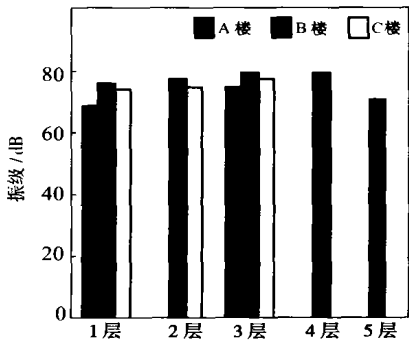


图 16 实测建筑物振级随楼层的分布

Fig. 16 Measured vibrations at different building floors

由列车振动引起的沿线地面建筑物的振动, 其振级的大小与建筑物的结构形式及基础类型有密切的联系(表 3)。

表 3 建筑物结构和基础类型对振动强度的影响

Table 3 Relative vibration levels for different buildings

建筑物结构类型	基础类型	相对振级/dB
高层建筑、钢筋混凝土框架结构	基础良好	0
多层建筑、砖石结构	基础一般	1~6
轻型结构、简易结构、临时建筑	基础较差	6~12

4 结束语

经过几十年的研究, 人们对轨道交通引起的环境振动特点已经有了相当的认识。但是, 对于这样一个由振源、传播路径和附近建筑物组成的链式振动系统, 其减振措施是有相当难度的。当前国内外学者的主要研究内容包括: 研究减振轨道、合理的高架桥梁结构形式等以降低振源强度, 研究隔振沟、阻振障、道床减振材料等以切断振动传播路径、衰减振动幅度, 调整轨道交通线路附近建筑物的自振特性以降低建筑物的振动, 研究制订轨道交通车辆—结构物系统振动对城市环境影响的控制标准以及相应的规划和设计技术对策, 并且已经获得了一定的研究成果。

参考文献:

[1] Japanese Institute of Noise Control: Regional Vibrations of Environments[M]. Tokyo: Jibaotang Press 2001. 8-9.
 [2] 夏 禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 216-254.

XIA He. Interaction Traffic and Structural Power[M]. Beijing: Science Press 2002. 216-254.
 [3] 江岛淳: 地盘振动と対策—基础・法令から交通・建设振动まで—[M]. 东京: 吉井书店, 1982. 111-122.
 [4] Fujikake T A. A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains[J]. J Sound & Vibration, 1986, 111(2): 289-297.
 [5] 吉冈修. 新干线列车走行による沿线の地盘振动[J]. 铁道技术, 1986, 43(7): 265-269.
 [6] Wilson G P. Control of ground-borne noise and vibration[J]. Sound & Vibration, 1983, 87(2): 339-350.
 [7] Kuzweil L. Ground-borne noise and vibration from underground system[J]. Sound & Vibration, 1979, 66(3): 450-452.
 [8] Degrande G. High-speed train induced field vibrations: in situ measurements and numerical modeling[A]. Proc Wave 2000[C]. 2000. 29-42.
 [9] Richart F E. Vibration of Soils & Foundations[M]. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc. 1970. 134-151.
 [10] Bata M. Effect on buildings of vibrations caused by traffic [J]. Building Science, 1985, 99(1): 1-2.
 [11] Dawn T M. Ground vibration from passing trains[J]. J Sound & Vibration, 1979, 66(3): 355-362.
 [12] Jiang J Q. Studies on dynamic soil-structure interaction of extended high pier bridges[D]. Okayama: Okayama University, 1993.
 [13] XIA He. Experimental study on train-induced vibrations of environments and buildings[A]. Proc MCCI' 2000[C]. 2000. 115-121.
 [14] 马 筠. 我国铁路环境振动现状及传播规律[J]. 中国环境科学, 1987, 7(5): 70-74.
 MA Jun. Current situation of train-induced vibrations of environments and its propagation[J]. China Environmental Science, 1987, 7(5): 70-74.
 [15] 王毅. 北京地下铁道振动对环境影响的调查与研究 [J]. 地铁与轻轨, 1992, 16(2): 21-24.
 WANG Yi. Investigation and study on vibration effects of Beijing underground trains upon environments[J]. Metro and Light Rail, 1992, 16(2): 21-24.
 [16] 潘昌实. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. 土木工程学报, 1990, 23(2): 21-28.
 PAN Chang-shi. Expenimental study on vibrations of underground trains at tunnel section[J]. Journal of Civil Engineering, 1990, 23(2): 21-28.
 [17] XIA He. Study of vibration effects of underground trains upon surrounding environments[A]. Proc Advances in Structural Engineering[C]. 1995. 116-122.
 [18] YANG Y B. Ground vibration induced by high-speed trains over viaducts [A]. Proc ISEV' 2003[C]. Hangzhou: 2003. 147-157.
 [19] Vollberg G. Propagation of ground vibration near railway tracks[J]. Sound & Vibration, 1983, 87(2): 371-376.
 [20] Yoshioka O. Basic characteristics of shinkansen induced ground vibration and its reduction measures[A]. Proc Wave 2000[C]. 2000. 219-239.