

Environmental Response Analysis of Metro Train Vibration

Xie Tang

Email: 476125@qq.com

Abstract

This paper first expounds the main principle of subway train vibration, then expounds the establishment of mechanical software analysis model through critical condition, grid size, related parameters, dynamic load, mechanical damping, 3D model and so on. Through the analysis of each parameter, finally summarizes the response of subway train vibration load frequency, tunnel buried depth, construction, geological conditions, single and double line opening to traffic and so on.

Keywords: *Subway Train; Vibration; Environmental Response*

地铁列车振动的环境响应分析

唐谢

长沙市轨道交通运营有限公司

摘要: 本文首先对地铁列车产生振动的主要原理加以阐述, 其次通过临界条件、网格尺寸、相关参数、动力荷载、力学阻尼、3D 模型等方面阐述力学软件分析模型的建立, 通过对各项参数的分析, 最后总结出地铁列车振动时荷载频率、隧道埋深、施工、地质条件、单双线通车等环境的响应情况。

关键词: 地铁列车; 振动; 环境响应

引言

在城市快速发展过程中, 地铁作为重要的交通组成部分, 为人们出行带来便利。地铁振动可对周围环境产生较大的影响, 甚至威胁人们安全。对此应对其振动时环境响应进行分析, 探究其传播规律, 进而找出减小振动产生影响的主要途径。

1 地铁列车振动产生原理

1.1 轨道建设存在误差

当前城市轨道交通建设时, 常使用无缝轨道, 在对接位置可产生较强作用力。钢轨长期处于地铁荷载作用下, 可能产生不同程度的变形。同时轨道施工环节可能存在部分误差, 使得轨道出现不平问题。除此之外, 过道起伏、损耗以及路基沉降、温差应力等因素都可致使轨道产生变形, 从而引发地铁振动。

1.2 随机产生各类不平顺

随机不平顺主要包括轨道间距、水平、高度、方向等方面, 以上几点不平顺的原因是导致列车振动主要原因。其中水平方向不平主要是列车车轮和轨道作用点不处于相同的高程, 此时即可导致地铁产生倾斜, 振动严重时还能出现脱轨隐患, 危害人们的出行安全。轨道间距不平主要是名义距离和实际距离存在差异。高度不平主要是线路可能出现高低不平的情况, 导致列车行驶时产生较大作用力, 引发竖向振动。方向不平主要指的是设计的轨道中心线和实际位置方向有所偏差。随机不平的情况复杂, 相关人员可收集各类数据, 经

过计算和分析,找出引发地铁产生振动的环境因素^[1]。

2 模拟地铁列车振动环境响应的过程

2.1 建立模型

在分析地铁振动环境影响因素,可基于 3DFLAC 分析软件建立力学分析模型。其功能强大,结合结构单元、热力学以及流体力学等计算,和 FLAC 相互配合,计算出地铁振动时地表产生的响应。

2.1.1 临界条件

在模型中,临界条件需要基于动力计算,当截取模型范围较大时,结果和真实情况越靠近。但是当模型尺寸过大时,会增加计算量,延长计算时间,因此需要对其临界条件进行限定,使得波传播在边界时产生反射现象,计算结果偏差较大。为避免这种现象产生的影响,在 3D 模型中可设置静态、自由场两种边界,降低波传输到边界产生的反射影响程度。在静态边界的界定方面主要是将模型边界位置的入射波加以吸收。在边界切向、法向等位置安装阻尼器,利用阻尼器为两个方向提供粘性力,将入射波更好的吸收。其中切向粘性力的计算公式为 $t_s = -\rho C_p v_s$,法向粘性力计算公式为 $t_n = -\rho C_s v_n$ 。在以上两公式中 ρ 代表介质密度, C_p 和 C_s 分别为 p 波与 s 波的速度, v_s 为边界切向速度分量, v_n 为边界法向速度分量。如果波入射角 $\theta > 30^\circ$,此静态边界可将入射波全部吸收;当波入射角 $\theta < 30^\circ$ 时,就不能被完全吸收。在自由场的边界设置方面,动力计算过程涉及地面结构时,应将模型不同侧面自由场运动情况考虑其中。在 3D 模型侧面生成自由场(一维或者二维)网格,利用阻尼器和边界网格耦合,仅将网格内不平衡力向边界主体网格中传递。

2.1.2 网格尺寸

3D 模型的动力计算过程中,当土体越软时,其弹性模量就越小。因此网格尺寸需求量越小,数量越多。在模型中网格尺寸应小于振源荷载最高频波长 $1/8 \sim 1/10$,这样才可保障振动波顺利传播。波长和土体的剪切波速相关,其计算公式为 $L = V_s / f$ 。传向地表的地铁振动的主频率接近 20Hz,结合模型,选择 1.0~2.0m 尺寸作为网格长度。

2.1.3 相关参数

地铁隧道的埋深为 30m,左右间距为 12m,盾构厚 0.3m,外径 6m,使用强度为 C50 的混凝土。测试区段岩土中含有填土、粉土以及粘土。其中填土层厚度为 4m,弹性模量为 5MPa;粉土层厚度 10m,弹性模量为 20MPa;粘土弹性模量为 40MPa。

2.1.4 动力荷载

模拟地铁运行导致的环境振动过程,可将加速度、应力、速度、集中力等时程当作输入过程的荷载,将时程加入到 3D 模型节点处。当地铁运行产生竖向的振动荷载时,列车自重的荷载极限 $\neq 0$ 时,就会产生模型下移问题。对此,在计算列车的自重静力时,将列车基线作为振动模拟的选取点,截取列车 13s 之内荷载作用,将其施加到轨道节点处,探究在地层内引发列车振动的主要原因以及响应规律。

2.1.5 力学阻尼

当物体处于振动状态时,材料之间的摩擦、接触面滑动以及外界作用等因素,都可使振动幅度逐渐减小。在 3D 模型的动力计算过程中,主要有两种阻尼。(1)瑞利阻尼,可减小地铁处于振动下的幅度,在动力方程 $C = \alpha M + \beta K$ 中, C 为阻尼矩阵、 K 为刚度矩阵、 M 为质量矩阵, α 和 β 为阻尼常数。和常见的力学分析类似,此阻尼计算理论计算出的振动响应和地铁的运动规律相符。但是使用这种计算方式也存在缺陷,即计算时间过长,不适用于工程计算。(2)局部阻尼主要是在节点位置减小质量,改变振动循环。当振动过

程节点速度增减量相同时，整个系统视为质量守恒。能量损失 ΔW 和瞬时应变 W 存在比例关系，最终比值为 D （临界阻尼比），计算公式为 $D = \frac{\Delta W}{W}$ 。在阻尼系数（ α_L ）的计算过程按照公式 $\alpha_L = \pi D$ 。

2.1.6 3D 模型

模型范围大小可影响计算结果的精准度。经过分析引发地铁振动的原因，可以得出模型深度、宽度等的选取应为剪切波长度 1.0~1.5 倍。在隧道埋深以及计算范围的取值不变时。经计算，当模型宽度大于隧道直径 15 倍时，底部尺寸大于隧道埋深 7 倍时，频率趋向稳定。分析过程忽略地铁振动纵向传播情况，最终选取模型尺寸为 $140m \times 70m \times 1m$ ，网格单元共计 21103 个，选取 32169 个节点。在模型上设置均匀监测点，相邻间距 $5m^{[2]}$ 。

2.2 结果分析

2.2.1 荷载频率产生影响

选取振幅为 $1kN/m$ ，振动荷载频率 5Hz、115Hz、60Hz 等。临界阻尼比在 2%~5%。在 3D 模型中，对无阻尼展开简谐振动的计算，获得隧道正上方振动时程，得到中心频率为 4.688Hz、14.844Hz、160406Hz。列车竖向的振动速度以及加速度产生的最大振幅位于中心线，曲线分布距离中心线越远越衰弱。荷载频率分别为 5Hz、115Hz、60Hz 时，距离中心线距离分别为 35m、15m、5m，总结出频率值越大，在放大区的位置和振源越靠近。

2.2.2 隧道埋深影响

建立隧道埋深模型，深度分别为 20m、40m，保持模型各项参数不变，将荷载施加到轨道节点处，计算不同埋深结果，对振动影响加以分析。经试验之后对振动响应速度分布进行观察，距离隧道中心下的位置越远，速度衰减越明显，逐渐趋向平缓。监测点埋深越大，速度峰值越小。因此可以总结出隧道的埋深可影响地铁振动时的响应速度以及振动的影响范围。隧道中土层覆盖厚度越小，振动波及范围越大，反之越小。

2.2.3 施工影响

通过测试发现影响地铁运行主要原因为 $<20Hz$ 的低频振动，此时说明在土体内部高频振动衰减较快，因此只能将隧道衬砌厚度和断面形状进行更改，保障监测点、隧道位置以及土层参数等不变，重新建立断面模型。地铁明挖隧道以及盾构隧道的形状各不相同，盾构隧道刚度小、厚度小。虽然隧道的断面形式不同，但是振动响应的幅度分布规律大致形同，和中心线距离越大，幅度越小。暗挖隧道衬砌厚度大，可阻碍振动波传输，其对地表产生影响较小。因此可结合地表对地铁振动的环境要求，合理调整断面的形式，增加其结构厚度，降低对地面产生的影响。

2.2.4 地质条件影响

地铁运行过程，车轮、轨道二者之间可产生剧烈作用，引发振动荷载，振动通过土体传向四周。在振动传播时，土体作为介质，其性质可能引发振动规律产生变化。在监测过程可选取不同的土质，在轨道节点处施加荷载，对比土质不同情况下各项计算结果，分析土质环境对地铁振动响应情况。经测试，在不同土质下，地铁纵向的振动速度以及加速度产生变化值是随中心线距离不同而变化的。距离越小，衰减越大。填土层土质硬，振动以及加速度产生变化范围比软土大。土层越软，振动的影响越小。

2.2.5 单双线通车

地铁在运行过程，处于同一断面中存在单线通车、双线通车等情况。选取隧道盾构模型，在地表间隔 $5m$ 设置一个监测点，保持参数不变，对比单线加载、双线加载两种方案，进而分析地铁在单双线运行时产生振

动的响应。当双线列车通过时，地铁的振动速度以及加速度的最大浮动值位于中心线的位置。距离隧道中心水平距离越大时，振动的幅度呈现出递减的趋势，同时产生放大现象，最后趋向平稳。当只有左侧列车通过时，地铁的振动速度以及加速度的幅值位于其左侧中心线的位置。当振动幅度随中心线的水平间距越大时，振动逐渐递减，并在距中心线 40m 处轻微放大。加速度幅值逐渐递减过程，隧道内右侧线的中心位置出现反弹。因为右线隧道产生的影响，导致当地铁列车进行单线运行时，地表速度以及加速度二者分布曲线和隧道的中心线不对称。由此可以得出，当地下存在管线、建筑基础、孔洞等结构时，会影响地铁运行时振动的传播情况。在同一断面中，对比于单线列车运行时的情况，在地铁双线运行时振动的速度以及加速度等幅度更大，振动产生的影响范围更广。因此在规划环节，结合环境对地铁振动的要求，避开敏感区域双线列车的交汇情况。

结论

总而言之，通过建立 3D 模型，分析出轨道节点位置各类环境因素对地铁的振动传播产生的影响，总结出隧道衬砌厚度、刚度、土体、运行环境、双线通车等因素对振动响应情况。在轨道工程建设过程中，相关人员应考虑到以上因素，避免地铁振动对环境产生较严重的影响，为人们的安全出行奠定基础。

参考文献

- [1] 刘子豪.列车荷载作用下地铁隧道结构的动力响应研究[D].北京交通大学,2017.
- [2] 杜云航.石家庄地铁某区段列车振动对沿线环境的影响研究[D].石家庄铁道大学,2017.
- [3] 邹蓓.地铁列车移动荷载下环境振动响应分析及减振研究[D].武汉理工大学,2017.