

交通荷载下带有高度差的场地振动响应

陈卓, 周伟, 马殿君

上海理工大学土木工程系, 上海

收稿日期: 2024年8月21日; 录用日期: 2024年9月17日; 发布日期: 2024年9月24日

摘要

本文以重载车辆所致地面振动为研究对象, 选取某城市电子厂房的待建场地的地勘情况进行仿真研究, 建立不同高度差下的车辆振动激励的响应分析, 主要对比在不同高度差下重载货车的仿真模拟振动响应。结果发现随着高度差的增加三个方向加速度RMS值均造成衰减并且衰减幅度逐渐放缓, Z向衰减最为显著, X向所受影响最小; X向在2~4 m处的中频段能量产生放大效应; 随着高度的增加三个方向主频均在逐渐降低, 且中低频段衰减较低频衰减迅速。

关键词

高度差, 微振动特性, 数值模拟分析

Vibration Response of Soil with Height Difference under Traffic Load

Zhuo Chen, Wei Zhou, Dianjun Ma

Civil Engineering Department, University of Shanghai For Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 21st, 2024; accepted: Sep. 17th, 2024; published: Sep. 24th, 2024

Abstract

In this paper, the ground vibration caused by heavy duty vehicles is taken as the research object, and the geological prospecting situation of a city electronic workshop to be built is selected for simulation research. The response analysis of vehicle vibration excitation under different height differences is established, and the simulation vibration response of heavy duty trucks under different height differences is mainly compared. The results show that with the increase of height difference, the RMS values in the three directions all cause attenuation and the attenuation amplitude slows down gradually. The attenuation in the Z direction is the most significant, and the effect in the X direction is the least. The X-direction amplifies the energy in the middle frequency

文章引用: 陈卓, 周伟, 马殿君. 交通荷载下带有高度差的场地振动响应[J]. 建模与仿真, 2024, 13(5): 5550-5557.

DOI: 10.12677/mos.2024.135502

band at 2~4 m. With the increase of height, the main frequency of the three directions gradually decreases, and the attenuation of the middle and low frequency band is faster than that of the low frequency band.

Keywords

Height Difference, Micro-Vibration Characteristics, Numerical Simulation Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国大力支持高科技企业,国内高科技、精密仪器生产也随之逐渐增多,这些高科技生产设备本就对场地周边振动极其敏感,再随着产品不断的迭代升级就需要更加追求高质量发展,而由于我国国土地形占比中平原仅占 12%,我国大部分地形以山地、高原、丘陵、盆地为主,这就导致高科技厂房有时不可避免地需要建设在与周边道路有高度差的场地内,那么对这种与周边道路存在高度差的情况下,车辆在其周边道路上行驶时,由于道路凹凸不平、车辆轮胎气压不稳定等原因导致的地面振动会经过地基向周围地层四周扩散,进而会对高科技厂房的场地内土体中振动响应产生什么样的影响是一个需要讨论的问题。

1991 年, Hunt [1] [2] 在其研究中指出,车辆在行驶过程中产生的荷载具有随机性,在分析车辆行驶所致地面振动的过程中,需将其简化为各种荷载动力模型来进行随机振动信号的输入。Hong [3] [4] 在 Hunt 的研究基础上,采用单轴双自由度的车辆模型,首先运用理论分析的方法,以 Lamb [5] 提出的振动波在半无限体表面的传播理论为支撑,计算了交通荷载所致路面振动的功率谱密度,然后通过现场实测分析方法,分析了不同土壤情况和路面粗糙程度下交通荷载所致地面振动的垂直加速度响应,经过对比发现实测与理论分析结果相吻合。申永刚[6] [7] 等以实际的工程为背景,将数值仿真分析、现场实测分析与车辆振动理论相结合,建立了黏弹性边界条件下的有限元模型,分析了有无隔振沟条件下城市交通振动荷载对邻近建筑结构的影响,分析结果表明车致地面振动产生的大小与车重、车速以及路面平整度有关,振动幅度的大小随着车速的增加而增大,随着距离的增大逐渐减小,而隔振沟可以有效减小高频振动幅度的大小。邹锦华[8] 等对广州市某两条道路进行了四种车型和不同车流量实测分析,对测试数据进行了 VLz 振级、加速度峰值和频谱特性的分析,分析结果表明,车辆行驶所致地面振动主要以竖向振动为主,且随着汽车车重、车速和道路结构刚度的增大,加速度振动响应逐渐增大。岳建勇[9] 等利用实测分析和数值模拟相结合的方法,分析了道路交通荷载对精密仪器坐落的某医学离子中心的基础底板振动响应,研究结果表明,受环境土层过滤和结构自身作用的影响,车辆振动所致基础底板振动响应频率集中在中低频的 2~10 Hz 范围内。马险峰[10] 等对上海地铁 16 号线高架段和磁悬浮高架段振动特性进行了现场实测分析,经过数据分析发现振动随着距离的增加逐渐衰减,以 20 Hz 为分界点,高频振动衰减快,低频振动衰减慢,且地铁高架段的振动频率集中在 30~60 Hz 之间,磁悬浮高架段则在 65~85 Hz 之间。

本文选取某电子厂房的待建场地,该场地与周边道路存在 6 m 的高度差,采用数值仿真分析的方法,使用 ABAQUS 有限元软件建立了大型重载车辆的交通荷载作用下的三维有限元模型,对场地内的振动响应分析,研究了不同高度差下道路交通所致地面振动荷载作用下的加速度 RMS 值、频谱曲线随高度的变化规律。

2. 有限元模型建立

2.1. 模型简化及材料参数确定

根据地勘报告可知，拟建项目场地土层起伏较大，因此，按照实际的土层厚度建立准确的有限元模型十分困难，为了方便处理，假设对于同一性质的土，在模型范围内厚度是相同的。拟建项目地及其周边的土层主要分为杂填土、黏土、强风化泥质砂岩和中风化泥质砂岩四类土层，考虑到实际工程中杂填土层不予采用，故在有限元建模时不予考虑，将其等效为黏土厚度进行处理，因此，只对剩余三层土的厚度进行简化，简化后各层厚度及其土体材料参数见表 1。

Table 1. Site soil mass parameter table

表 1. 场地土体参数表

序号	土层	层厚/m	密度/kg·m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比
1	黏土	15	2000	0.35	0.35
2	强风化泥质砂岩	5	2300	4.5	0.36
3	中风化泥质砂岩	10	2400	24.78	0.28

在进行环境振动分析时，环境振动的材料阻尼较小，同时根据实测结果了解到土体振动位移也很小，可以近似认为土体仅发生弹性变形，因此分析时将土体作为线弹性模型进行处理，不对其施加材料阻尼。

2.2. 模型单元尺寸处理

在进行有限元分析时，采用 Dynamic implicit 的格式对时域内的加速度时程数据进行直接的时间积分，单元采用完全积分的八结点线性六面体单元 C3D8 类型。进行网格划分时，根据文献[11]建议，在保证计算精度要求下，单元尺寸不超过最小波长的十分之一，对于土体结构来说，近场和远场的最大主频不同，近场最大主频约为 50 Hz，远场最大主频约为 3~4 Hz，根据地勘报告提供的土体最小的等效剪切波速为 188 m/s，由此计算出最大单元尺寸应不超过 0.6 m，故在建模时选取网格尺寸为 0.25 m。

2.3. 土体模型边界处理

考虑振动在土体传播是一个近似无限边界的过程，而有限元建模时不可能将模型建立无限大，但又要考虑振动波在边界时产生的反射效应。因此在 ABAQUS 有限元软件中对模型边界进行处理时，采用无限单元边界来模拟，如图 1~4 为无限元边界的模型。

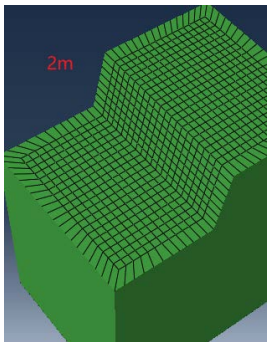


Figure 1. 2 m
图 1. 2 m

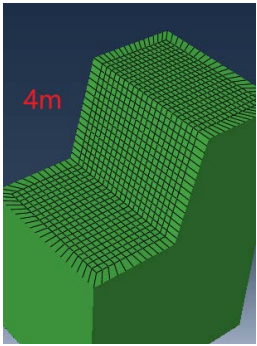


Figure 2. 4 m
图 2. 4 m

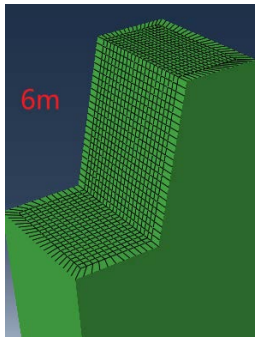


Figure 3. 6 m
图 3. 6 m

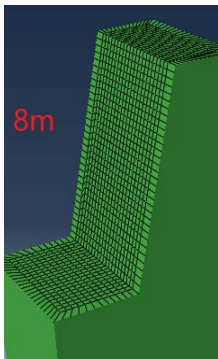


Figure 4. 8 m
图 4. 8 m

2.4. 道路交通振动荷载施加

在进行道路交通荷载环境振动模拟时，以加速度边界的形式对模型施加时域内的加速度，为简化振源的施加，将道路交通荷载的振源简化为线荷载，作用于荷载施加区域的边界线上，如图 5，在进行振动荷载施加时，选取加速度时程曲线时间长度为 4 s，施加的加速度时程曲线，见图 6。

3. 数值仿真结果分析

3.1. 振动响应分析

对不同高度差的土体进行数值计算后，得到了各高度下 X、Y、Z 三个方向的加速度 RMS 值并将四

个高度分别与 0 m 做对比，如表 2，可以看出随着高度的增加微振动响应均呈现衰减的趋势。

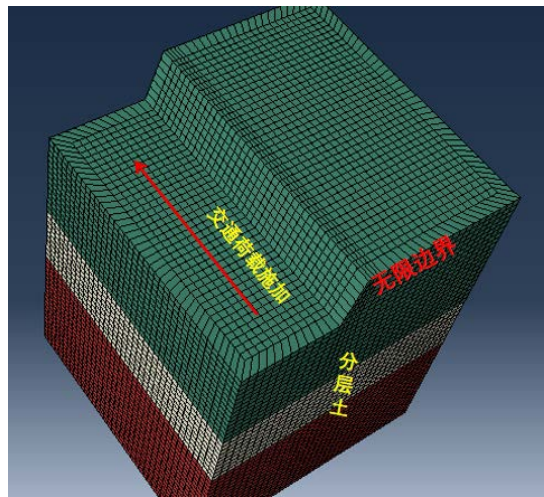


Figure 5. Traffic load is applied
图 5. 交通荷载施加

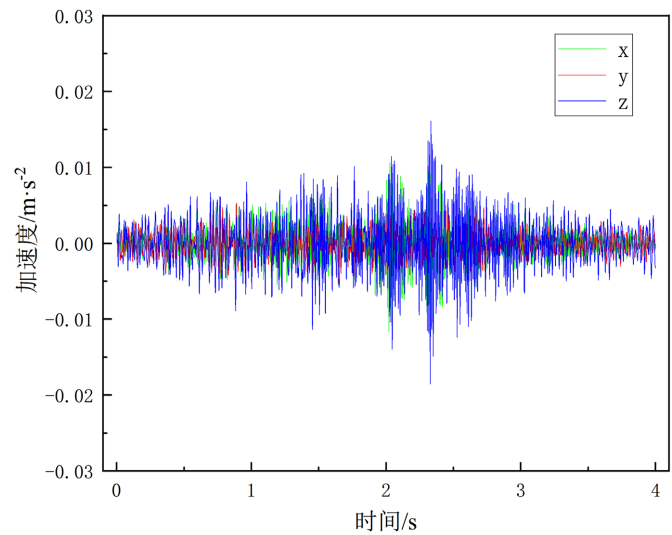


Figure 6. Road traffic vibration source input
图 6. 道路交通振源输入

Table 2. Differential dynamic response of soil with different heights under the action of heavily loaded vehicles
表 2. 重载车辆作用下土体不同高度差动力响应

高度差(m)	高度(m)	加速度 RMS 值		
		X ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Y ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Z ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
2 m	0 m	0.002767	0.000783	0.003031
	2 m	0.002320	0.000296	0.000975
4 m	0 m	0.002757	0.000838	0.003038
	4 m	0.002326	0.000180	0.001452

续表

6 m	0 m	0.002777	0.000786	0.003015
	6 m	0.002023	0.000148	0.000715
8 m	0 m	0.002735	0.000786	0.003016
	8 m	0.001739	0.000132	0.000695

取四次仿真计算中 0 m 处 RMS 平均值与 2 m、4 m、6 m、8 m 处 RMS 值对比绘制，如图 7，可以看出三个方向 0 m 处 Z 向最大，X 向其次，Y 向最小符合车辆振源大小规律；X、Y、Z 三个方向均产生了衰减，X 向随着高度的增加稳定衰减，在 6 m 后衰减逐渐趋于平稳，且 Y 向整体来看最小，在高度差达到 4 m 后衰减趋于平稳，但不同的是 Z 向在 4 m 时振动衰减放缓，在 6 m 后衰减趋于平稳。

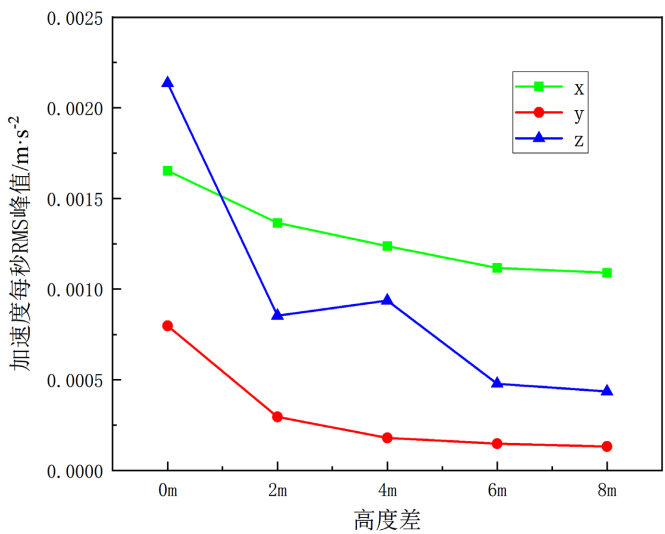


Figure 7. Acceleration RMS under different height difference
图 7. 不同高度差下加速度 RMS

3.2. 频谱曲线分析

接下来分别分析三个方向下在 0 m、2 m、4 m、6 m、8 m 处的频谱并绘制相应的对比频谱曲线，如图 8~10，可以看出 X 向的主频分布在 15~55 Hz，Y 向、Z 向主频主要集中在 35~55 Hz；X 向在低频 45 Hz 以下的部分随着高度的增加能量在逐渐降低，而 45 Hz 后能量在 0~4 m 处呈现小幅度放大；Y 向在 2 m 处能量衰减较快，在主频范围内随着高度的增加能量持续衰减；Z 向主频随着高度的增加能量衰减平稳。

4. 结论与讨论

本文在输入实际重载货车振源的激励下对比了土体在 0 m、2 m、4 m、6 m、8 m 高度差下的振动响应情况，通过对比加速度每秒 RMS 值峰值以及三个方向频谱曲线对比，得出以下结论：

- 1) X、Y、Z 三方向加速度 RMS 值均在 2 m 处衰减明显，6 m 后的加速度衰减趋于平缓；
- 2) 在高度差的存在下，Z 向 RMS 值衰减最为显著，并且在 2 m 与 4 m 处的衰减幅度接近，X 向 RMS 值所受影响最小；

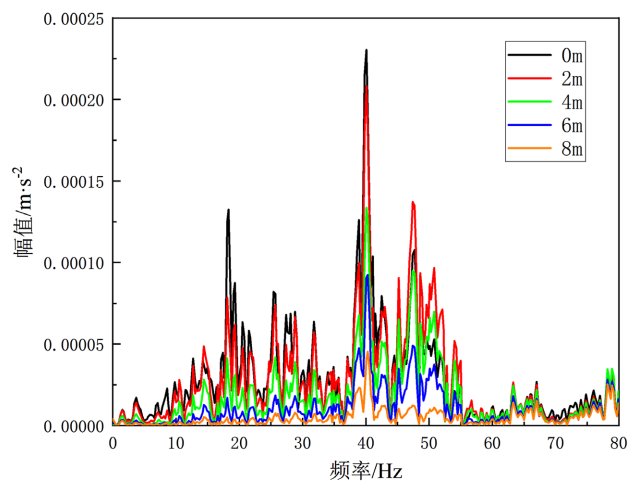


Figure 8. X to spectral contrast
图 8. X 向频谱对比

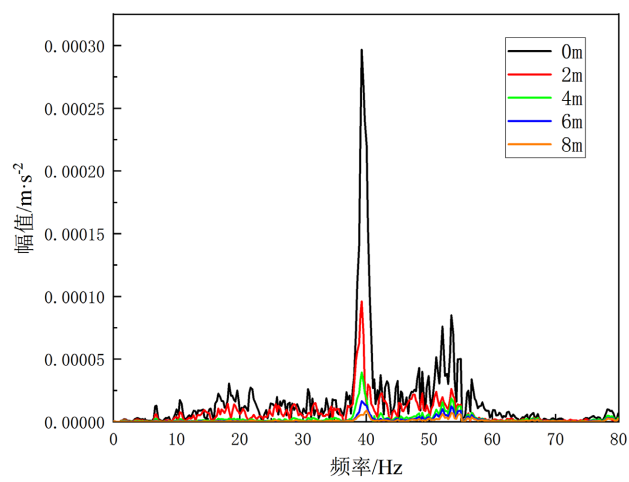


Figure 9. Y to spectral contrast
图 9. Y 向频谱对比

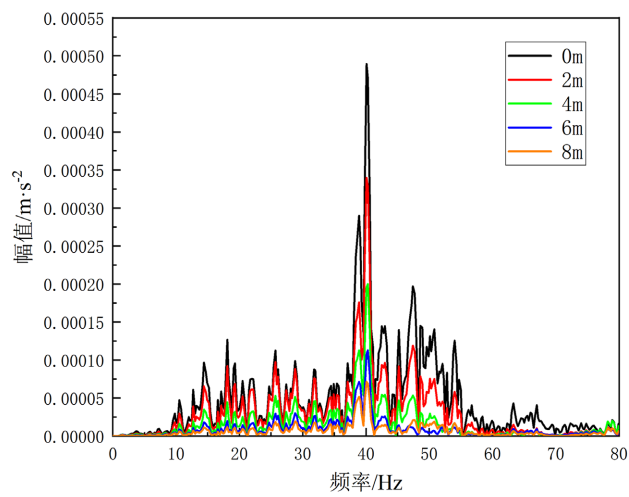


Figure 10. Z to spectral contrast
图 10. Z 向频谱对比

3) 随着高度的增加 Y、Z 向主频在逐渐降低, 相应能量也在逐渐减小, 且中低频段(35~55 Hz)衰减较低频衰减迅速, 原因可能因为高频部分土体振动频次高在振动中损耗的能量也相对较多;

4) X 向在 2~4 m 处的中频段(45~55 Hz)内能量产生放大效应, 在电子厂房选址时应多留意中频段的能量表现。

参考文献

- [1] Hunt, H.E.M. (1991) Modelling of Road Vehicles for Calculation of Traffic-Induced Ground Vibration as a Random Process. *Journal of Sound and Vibration*, **144**, 41-51. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(91\)90731-x](https://doi.org/10.1016/0022-460x(91)90731-x)
- [2] Hunt, H.E.M. (1991) Stochastic Modelling of Traffic-Induced Ground Vibration. *Journal of Sound and Vibration*, **144**, 53-70. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(91\)90732-y](https://doi.org/10.1016/0022-460x(91)90732-y)
- [3] Hao, H. and Ang, T.C. (1998) Analytical Modeling of Traffic-Induced Ground Vibrations. *Journal of Engineering Mechanics*, **124**, 921-928. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1998\)124:8\(921\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1998)124:8(921))
- [4] Hao, H., Ang, T.C. and Shen, J. (2001) Building Vibration to Traffic-Induced Ground Motion. *Building and Environment*, **36**, 321-336. [https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(00\)00010-x](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(00)00010-x)
- [5] Lamb, H. (1903) On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, **72**, 128-130.
- [6] 申永刚, 张治成, 谢旭. 复杂场地车辆引起的环境振动[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1089-1096.
- [7] 申永刚, 项贻强. 行驶车辆引起复杂场地及结构振动的试验研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 89-94.
- [8] 邹锦华, 陈焰华, 黄龙田, 等. 交通荷载作用下市政道路路面振动测试与分析[J]. 路基工程, 2019(5): 40-46.
- [9] 岳建勇, 蔡忠祥, 童园梦. 道路交通激发的特殊精密仪器基础振动现场实测与数值分析[J]. 建筑科学, 2020, 36(S1): 239-244.
- [10] 马险峰, 李金定, 何斌, 等. 轨道交通诱发土体振动特性的现场测试研究[J]. 喀什大学学报, 2021, 42(3): 40-43.
- [11] Zerwer, A., Cascante, G. and Hutchinson, J. (2002) Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **128**, 250-261. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2002\)128:3\(250\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2002)128:3(250))