

不同坡度对汽车机械厂房作用下的振动响应

李兆昱, 任青

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2024年8月5日; 录用日期: 2024年8月30日; 发布日期: 2024年9月6日

摘要

本文通过实地三向测试来分析不同边坡对汽车机械厂房的振动响应, 并用于验证模型的准确性。采用 abaqus 隐式动力有限元单元法建立边坡模型, 研究了不同的坡度对于机械厂房的振动影响。以速度 RMS 作为响应标准, 计算了不同坡度条件下的振动响应。在此基础上提取了模型部分监测点的频谱曲线, 揭示了坡度对于单体边坡振动响应的定量作用规律。数值结果表明: 在 X 和 Y 方向上, 随着坡度增加到 30° 时, 从速度 RMS 上看有放大效应, 应尽量避免; 坡度增加到 50° 时, X 方向速度 RMS 最小, 坡度增加到 70° 时, Y 和 Z 方向上最小; 坡度由 70° 继续增加至 90° 时, 三个方向的速度 RMS 都有所增加, Z 方向上最明显, 说明直角坡从减振效果不是最好选择。

关键词

坡度, 振动响应, 动力有限元, 均方根值

Vibration Response of Different Slopes to the Action of Automobile Machine Shops

Zhaoyu Li, Qing Ren

College of the Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 5th, 2024; accepted: Aug. 30th, 2024; published: Sep. 6th, 2024

Abstract

This paper analyzes the vibration response of different slopes on an automotive machine shop building through field three-way tests and is used to verify the accuracy of the model. The abaqus implicit dynamic finite element method was used to model the side slopes, and the vibration effects of different slopes on the machinery factory building were investigated. The vibration response under different slope conditions was calculated using velocity RMS as the response criterion. On this

basis, the spectral curves of some monitoring points of the model were extracted to reveal the quantitative effect law of slope gradient on the vibration response of a single slope. The numerical results show that: in the X and Y directions, as the slope increases to 30°, there is an amplification effect from the velocity RMS, which should be avoided as much as possible; the velocity RMS in the X direction is the smallest when the slope increases to 50°, and it is the smallest in the Y and Z directions when the slope increases to 70°; the velocity RMS increases in all three directions when the slope continues to increase from 70° to 90°, and it is the most obvious in the Z direction, indicating that right-angle slope is not the best choice from the vibration damping effect.

Keywords

Slope, Vibration Response, Dynamic Finite Element, Root-Mean-Square (RMS) Value

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

振动现象作为自然界与工程领域的普遍现象,其复杂性及影响深度广受关注。在桥梁、道路、铁路及汽车制造等关键工程领域,振动分析与控制技术不仅是确保结构安全、提升运行效率的关键,也是技术创新的重要方向。然而,以往的研究往往侧重于振动本身的特性及控制策略,对于地形条件,特别是坡度变化对振动行为的具体影响,探讨尚显不足。在实际应用中,地形条件尤其是坡度变化对振动行为的影响往往被忽视或简化处理,这可能导致结构安全性的降低、运行效率的下降乃至使用寿命的缩短[1][2]。

近年来,随着工程技术的不断进步和复杂工程结构的不断涌现,坡度对振动响应的影响逐渐受到重视。坡度作为地形地貌的基本特征,其变化直接影响振动系统的支撑条件、质量分布及能量传递路径,进而显著影响振动特性[3][4]。例如,在黄土公路边坡的研究中,已发现不同坡形(如凹形坡、线形坡等)对汽车振动作用下的边坡动力响应存在显著差异,且这些差异与边坡的稳定性密切相关。此外,汽车振动乘坐舒适性的研究也表明,地面不平整(包括坡度变化)是导致车辆振动加剧、影响乘坐舒适性的重要因素之一。

本文旨在通过系统研究,揭示坡度变化对汽车机械厂房振动特性的影响机制,为工程结构的优化设计、振动控制及灾害预防提供科学依据。通过总结前人的研究成果,结合最新的实验数据和理论分析,本文期望能够填补该领域的研究空白,推动相关技术的进步与发展。

综上所述,本文的研究不仅具有重要的理论价值,而且在实际应用中具有广泛的指导意义。通过深入探讨坡度与振动之间的关系,我们可以为工程结构的安全性、运行效率及使用寿命提供更为可靠的保障,同时也为振动控制技术的创新与发展提供新的思路和方法。

2. 现场测试

2.1. 测试地点

测试场地选在一汽车机械零件加工厂旁,测点1选在靠近工厂的墙角下,测点2选在边坡下,见图1。边坡高度为1 m,角度为10°。为保障测试振源唯一,测试时会记录附近车辆经过时间并在数据并在

后处理时剔除。周围无其他明显振源干扰。

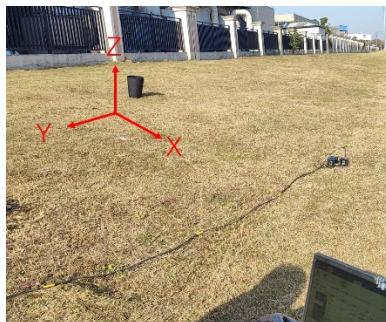


Figure 1. Test environment
图 1. 测试环境

2.2. 测试设备

本实验采用设备东华测试公司研发的动态信号测试分析系统、DH5922D 采集仪和 2D001 型传感器。为确保获得精确结果,本次测试采样频率设为 500 Hz。由于传感器测试时需要放置水平,测试时使用铁锥插入土体,使上端保持水平,将传感器放置上方,见图 2。且在放置时 X 向垂直边坡, Y 向为平行于边坡, Z 向为竖直向,见图 1。



Figure 2. Placement of test equipment and sensors
图 2. 测试设备和传感器的摆放

2.3. 测试结果分析

速度 RMS (速度均方根)可以表示振动的能量强度, 对测试数据在时域内求均方根可以反应每个测点处振动能量的大小[5]。将测试数据的各个测点求出均方根值, 可以更准确的反应振动能量的响应规律。在下图中给出了 6 组振源和坡下实测速度 RMS, 见图 3。由图 3 可知在 X 方向和 Z 方向上在振源在经过一个 10° 的下坡后, 速度 RMS 出现了减小, 分别平均减小了 30% 和 13%。而在 Y 方向上, 经过下坡之后出现了增大, 增大了平均 61%。明显在 Y 方向上, 坡度的变化对振动响应有个放大效应, 这可能是随着坡度的增加, 改变了土体波的传播, 导致了波的叠加。

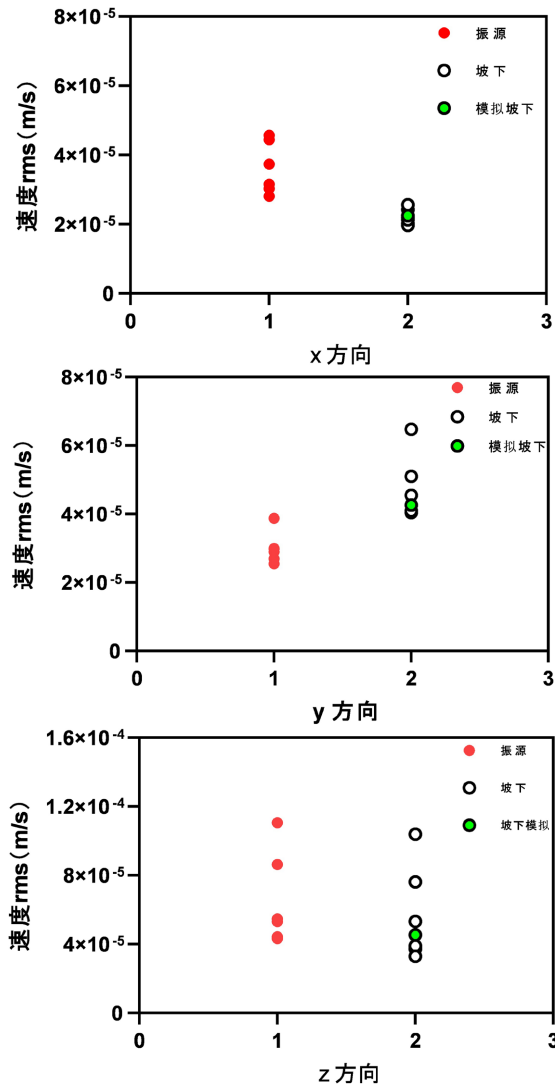


Figure 3. Vibration response of three-direction slope to velocity RMS with numerical simulation verification
图 3. 三方向边坡对速度 RMS 的振动响应与数值模拟验证

3. 数值模型建立

3.1. 模型建立

本文模型使用 ABAQUS 所建立, 模型长为 25 m, 宽 30 m, 高为 17.6 m, 分别建立了坡度为 10° 、

20°、30°、50°、70°、90°的模型, 见图 4。土体参数由勘测报告可知, 见表 1。

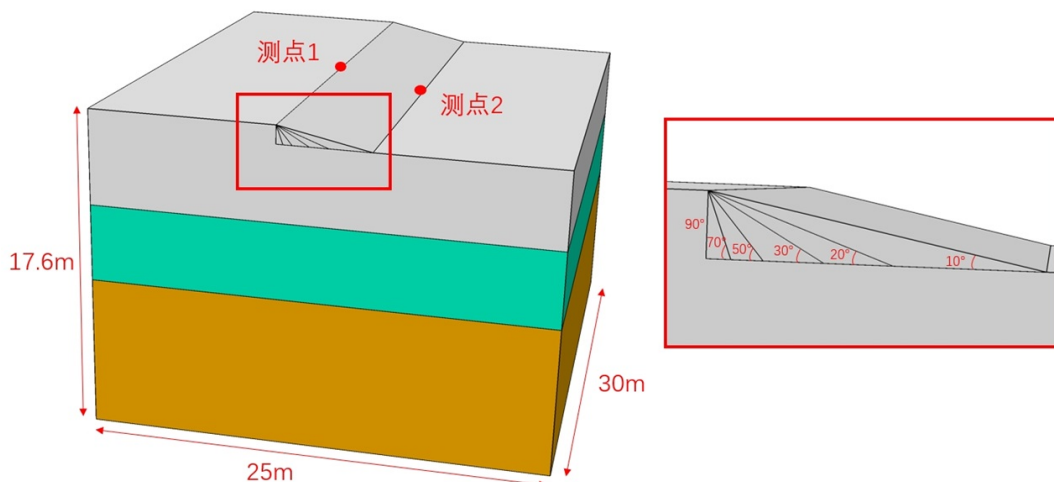


Figure 4. Schematic diagram of model and simulated slopes
图 4. 模型和模拟坡度示意图

Table 1. Parameter list of surveyed soil layers

表 1. 勘测土层参数表

序号	名称	厚度(m)	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比
1	粉质粘土 1	4.2	1850	120	0.3
2	淤泥质粉质粘土夹粉土	4.2	1760	99	0.35
3	粉质粘土 2	8.4	1920	210	0.4

3.2. 振源的输入

本文将测点 1 所得的一组实测数据导入作为模型的输入振源, 见图 5。

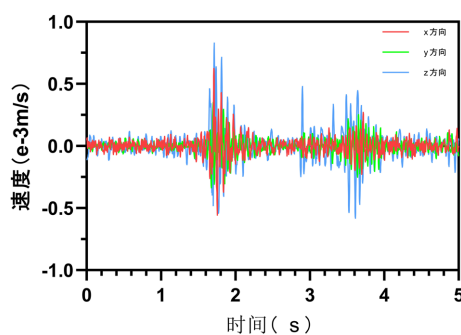


Figure 5. Model input vibration source
图 5. 模型输入振源

3.3. 分析时间步长

本文在三维有限元模型计算时采用的动力隐式分析步, 利用多次迭代的时间积分法处理时域内的速度时程数据, 选择合适的分析时间步长对分析至为重要。钱胜国[6]指出时间步长不应该大于结构自振周期的 1/10, 当时间不长为自振周期的 1/50 时, 计算结果误差可忽略不计。由模态分析得出, 本模型的第

一节主频为 3.56 Hz, 自振周期为 0.302 s, 实测的振源采样频率为 500 Hz, $1/500 = 0.002 \text{ s} < 0.302/50 = 0.00604 \text{ s}$, 故在既要保证模型计算精度和计算效率下, 本模型采用与实测振动采用频率一致的 0.002 s。

3.4. 模型单元尺寸

本文数值模型均采用三维实体八节点单元 C3D8R, 由文献[7]可知, 为保证模型的计算结果准确性, 单元尺寸不应该小于最小波速波长的 1/10。由地勘报告可知本场地的剪切波速为 150 m/s 到 180 m/s, 近场的主频在 20 Hz, 则最小的波长为 0.75 m, 但为了获取更为精确的振动响应, 将土体模型的单元尺寸设置为 0.4 m。

3.5. 模型边界条件

人工截断土体会导致振动波在截断处产生反射效应, 严重影响计算结果的准确性, 采用无限单元边界来模拟实际土体的无限界域[8] [9]。

3.6. 模型的验证

本文将图 5 的振源输入模型, 提取测点 2 的速度 RMS, 与实测的测点 2 的速度 RMS 进行对比, 在一个可以接受的误差范围之内, 故模型准确, 见图 6。

4. 数值分析

4.1. 边坡的振动响应

根据数值模拟时程结果绘制出测点 2 不同坡度得到的速度 RMS 散点图, 见图 6。由图可知, 在 X 方向上, 总体呈下降趋势, 当坡度在 20°到 30°时, 随坡度变化明显, 出现剧烈上升达到个最大值, 之后在 50°下降到最小值。在 Y 方向上随坡度增大, 变化最为明显, 相比于 10°增大了 43.1%, 之后快速下降, 在 70°降到最小值。在 Z 方向上随着坡度增加总体呈下降趋势, 在 70°降到最小值。从 X、Y 方向看, 随着坡度增加到 30°时, 速度 RMS 都出现了增大, 对水平方向都存在个放大趋势, 对 Y 方向上更为明显。当坡度从 70°逐渐提升至 90°时, 振动响应在三个维度上均呈现显著的增强趋势, 其中, 以 Z 方向上的增幅最为瞩目, 表现出最为明显的振动加剧现象。

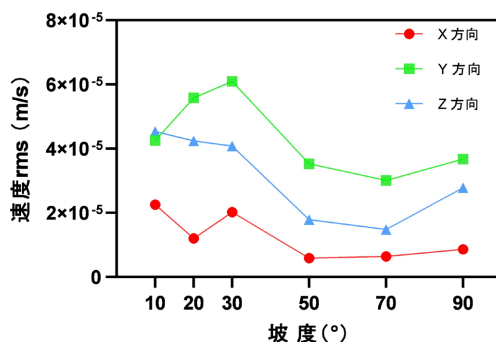


Figure 6. Velocity RMS for simulated slope change

图 6. 模拟坡度变化速度 RMS

4.2. 频谱分析

以下根据图 5 提取速度 RMS 随坡度增大发生转折点的频谱曲线图来进一步分析, 见图 7。在采样时存在电流 50 Hz 的共频干扰, 在后处理进行傅里叶变换时使用了滤波工具剔除 49 Hz~51 Hz 的信号。低

频决定了能量的大小, 由图 6 也能看出图 5 的大小关系, Y 向的速度 RMS 最大, X 向最小。在 X 方向可以看出 25 Hz 以下, 幅值随着坡度的增加都在减小; 而在 24 Hz 到 26 Hz 和 53 Hz 到 70 Hz 之间随着坡度增加先增加再减小, 由此可见中高频对振动的响应也有影响。随着坡度的继续增加, 中高频部分会大幅减小。在 Y 方向幅值随坡度的增加先增大后减小, 符合我们在 Y 向得到的速度 RMS 的变化规律。也有此可以看出 Y 向对坡度的变化最为敏感。当坡度为 10° 时, Z 向的第一主频为 12.2 Hz; 坡度增加到 30° 和 70° 时第一主频变为了 18.1 Hz 和 14.5 Hz。而在中高频部分也出现了 X 向的幅值先增大后减小的现象。

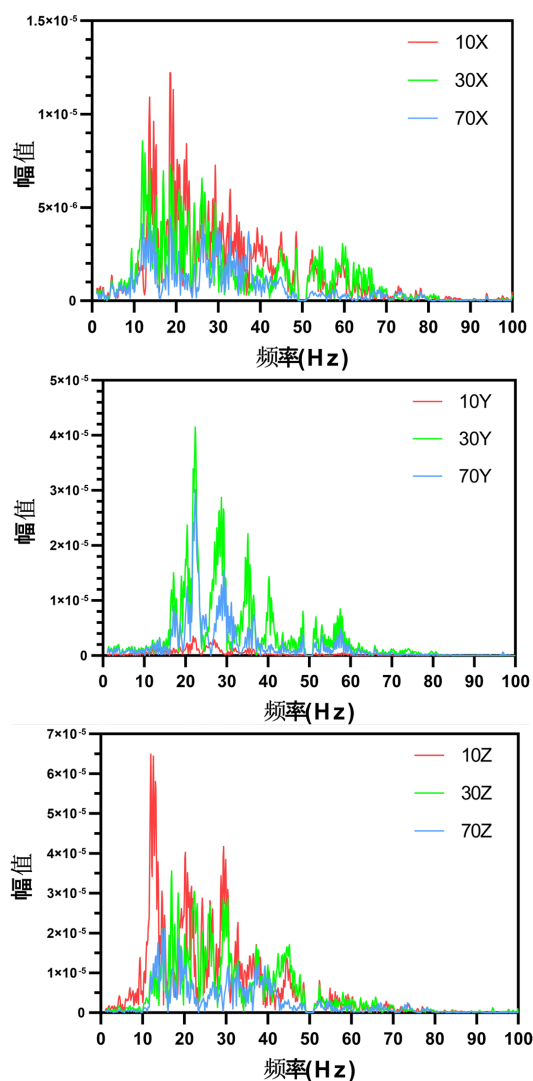


Figure 7. Spectral plots of turning nodes (X, Y, Z)

图 7. 转折节点频谱曲线图(X、Y、Z)

5. 讨论与结论

本文采用动力有限单元法, 以速度 RMS 作为振动响应的量化标准, 深入探讨了不同边坡坡度对汽车机械厂房所引发的振动响应规律, 旨在揭示坡度变化与振动特性之间的内在联系。得出以下结论:

1) 在 X 方向上的振动响应呈现出一个独特的趋势: 总体呈现下降趋势, 但在坡度从 20° 攀升至 30° 的区间内, 振动突然急剧上升并达到一个显著的最大值, 随后在坡度达到 50° 时, 振动又显著下降至一个

最小值。

2) Y 方向上的速度 RMS 值对坡度的变化尤为敏感。随着坡度的增加, 特别是在 20°至 30°的范围内, 出现了一个明显的放大效应, 导致振动显著增强。因此, 若 Y 方向的振动控制要求较为严格, 设计时应尽量避免选择此坡度区间。

3) 与 X 和 Y 方向不同, Z 方向上的速度 RMS 值随着坡度的增加总体呈现出下降趋势。特别是在坡度达到 70°时, 振动降至最低点, 表明在该坡度下, Z 方向的振动得到了有效的抑制。

4) 在三个维度的振动分析中, 随着坡度从 70°逐渐递增至 90°, 各方向的振动响应均显著增强, 尤以 Z 方向上的增幅最为突出。这一发现强调了在设计及处理边坡振动响应时, 应审慎避免采用直角坡或过于平缓的坡度, 转而优选介于 50°至 70°之间的坡度, 以优化振动控制效果。具体而言, 50°坡度在 X 方向上展现出良好的减振性能, 而 70°坡度则在 Y 向及 Z 向上具有更为显著的减振优势, 这为实际工程中的边坡设计提供了有力的数据支持与指导原则。

参考文献

- [1] 邓鹏. 单体边坡地形的地震动力响应及其放大效应的数值分析[J]. 地震学报, 2020, 42(3): 349-361.
- [2] 唐俭政, 张齐, 黄颖婷, 等. 含软弱夹层场地的一维等效线性化地震响应研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(1): 36-42.
- [3] 丁梓涵, 赵其华, 彭社琴, 等. 岩层倾角对顺倾向边坡地震效应的影响[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 956-962.
- [4] 宋战平, 刘洪珂, 郑方, 等. 考虑层理倾角的硬质砂岩力学行为及破裂响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(12): 167-175.
- [5] 李生, 任青, 周伟. 环境振动下桩基础微振动特性试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2023, 23(4): 138-140.
- [6] 钱胜国. 结构动力有限元分析步长 Δt 的选择[J]. 长江科学院院报, 1989(4): 15-23.
- [7] 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))
- [8] 黄万超, 王彤彤, 张程, 等. 不同边界效应的渡槽地震动破坏模式研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(7): 140-146.
- [9] 解裕荣, 陈乐, 杨俊芳, 等. 基于动应力响应的路基振动碾压性能仿真分析[J]. 铁道建筑, 2024, 64(5): 134-139.