

移动荷载作用下土体动力反应数值模拟^①

张继强^{1,2}, 冯瑞成³, 汤爱平^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 中交路桥技术有限公司, 北京 100011)

摘要:在研究轨道振动荷载的产生机理基础上, 归纳出一个能够涵盖速度、线路不平顺、轮重、轨枕对轮载的分散作用等因素在内的轨道荷载解析表达式, 以此作为输入施加到土体模型上, 利用 ANSYS 模拟地基土在轨道移动荷载作用下的三维瞬态弹塑性反应。通过计算得到土体不同位置位移和加速度时程曲线, 并得出如下结论: 荷载刚施加时地面位移会有一个突变, 但是随着荷载的移动会达到一个稳定值, 并随着水平面内远离轨道, 该值逐渐衰减; 荷载刚刚施加时加速度会有一个突变值, 随着荷载的移动逐渐趋于零。轨道机车速度对竖向方向的位移和加速度影响不大。

关键词:移动荷载; 数值模拟; 黏弹性人工边界; 时程分析; 轨道谱

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0778-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0778

Numerical Simulation of Soil Dynamic Response under Moving Loads

ZHANG Ji-qiang^{1, 2}, FENG Rui-cheng³, TANG Ai-ping^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of Ministry of Education

(Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, Heilongjiang, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

3. CCCO Road and Bridge Consultants Co. Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: A model of moving traffic vibration loads is developed on the basis of vibration mechanism analysis. Some factors related to vibration such as the speed or bumping motion of the train, the weight of the wheels, and the dispersion effect of the sleeper car are included in this model. A three-dimensional (3D) elastic-plastic finite element model of foundation soil is then established in ANSYS. The Drucker-Prager model is chosen to simulate the soil's non-linear characteristics. The bottom of the model is constrained within the horizontal plane. A 3D viscoelastic artificial boundary is adopted to simulate the bottom of the model and the boundary condition. Under moving traffic loads, the time-history curves of the displacement and the acceleration in various places in the foundation soil are calculated, and several conclusions are drawn. When the load is stationary, the displacement exhibits an abrupt change. However, as the load moves, the displacement maintains a stable value that decreases with distance from the track. When the load is just on, the acceleration also exhibits an abrupt change, with values trending closer to zero as the load moves. Therefore, train speed has little effect on vertical displacement and acceleration.

Key words: moving load; numerical simulation; visco-elastic artificial boundary; time-history analysis; track spectrum

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863)(2008AA11Z104)

作者简介: 张继强(1982-), 男, 博士生, 主要从事土动力方面的研究工作。

通信作者: 汤爱平(1968-), 男, 教授, 主要从事生命线工程防灾的研究与教学工作。E-mail: tangap@hit.edu.cn。

0 引言

车辆荷载引起的环境振动作用已经影响到人类生活和社会活动,其中车辆荷载对路基和地基的破坏给交通的可持续发展带来了严重威胁。国内外许多学者对车辆荷载的振动问题已经进行了深入的研究,如英国的铁路研究所,日本的竹宫和宏,我国的陶夏新、夏禾、高广运、黄云敏、圣小珍、边学成等都取得了良好的成果。在这些研究的基础上,本文利用振动观测台阵实测的车辆振动信息,采用数值分析方法探讨研究移动的车辆荷载作用下地基土的动力响应特性,以期获得可靠的评价一般场地条件下土体振动损害的实用性新方法。

1 移动荷载

忽略列车荷载与轨道的耦合作用,考虑振动荷载的产生机理(车辆因素、轨下基础因素等)后,利用数值拟合方法,在台阵振动观测的基础上归纳出一个能够涵盖速度、线路不平顺、矢高、轮重、轨枕对轮载的分散作用等一系列因素在内的列车荷载表达式:

$$F(t) = k_1 \times k_2 \times F_0(t) =$$

$$k_1 \times k_2 \times (P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t) \quad (1)$$

其中: k_1 表示整个列车荷载所产生的动力响应的轮载在线路方向进行组合叠加时的叠加系数,本文取值为 1.538(一般为 1.2~1.7); k_2 为每个轮载力被 5 根轨枕传递和分担时的分散系数,本文取 0.7(一般为 0.6~0.9); P_0 表示车轮静载; P_1 、 P_2 、 P_3 分别表示对应于线路几何不平顺控制条件中某一典型值的振动荷载。令列车簧下质量为 M_0 ,则相应的振动荷载幅值为:

$$P_i = M_0 a_i \omega_i^2 \quad (2)$$

式中: a_i 表示相应于不平顺控制条件下的几何不平顺矢高,反映路况;簧下质量 M_0 取为 750 kg; ω_i 为振动圆频率,其值为:

$$\omega_i = 2\pi v / L_i \quad (3)$$

其中: v 为列车运行速度; L_i 为几何不平顺曲线的波长。

对应于行车平稳、附加动载、波形磨耗三种线路几何不平顺控制条件,分别取其典型的不平顺振动波长和相应的矢高为: $L_1 = 10$ m, $a_1 = 3.5$ mm; $L_2 = 2$ m, $a_2 = 0.4$ mm; $L_3 = 0.5$ m, $a_3 = 0.08$ mm。列

车荷载表达式虽然简单,但它与车辆振动性质、线路平顺性或路况、车速、荷载组合与传递关系密切,能在一定程度上模拟车辆荷载^[2]。

2 模型与建模方法

采用 ANSYS 建模,计算中土体采用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型,采用 SOLID45 单元,边界采用 COMBIN14 单元,模型长 70 m,宽 30 m,高 8 m。采用人工黏弹性边界,在底边界施弹簧阻尼,并约束水平面内位移。地基土为均匀土层,密度为 2 000 kg/m³,泊松比为 0.3,弹性模量为 156 MPa,土体剪切波速为 173 m/s,黏聚力为 2 500 Pa,内摩擦角为 30°^[3](图 1)。

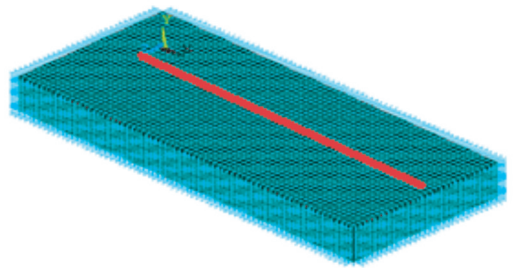


图 1 铁路路基数值模型

Fig.1 The numerical model of railway roadbed

为了便于讨论,定义荷载的运动方向为 X 方向,水平面内垂直于运动方向为 Z 方向,垂直于地面的为 Y 方向。利用 ANSYS 对所建模型进行分析,发现 X 方向位移和加速度较小,Y 方向最大,Z 方向居中。故本文仅分析竖直方向即 Y 方向的土体反应。

在截面上选取几个典型的关键点来分析土体表面位移和加速度,即沿 Z 方向 0 m、3 m、6 m、9 m、12 m 及 15 m 取六个关键点。所选取的关键点如图 2 所示。

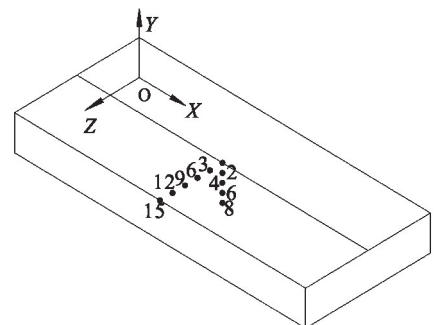


图 2 振动台观察台阵中选取的测量点

Fig.2 The measured points in observation-array

3 试验结果与分析

针对上述的关键点,提取它们的位移和加速度时程曲线,并做如下分析^[4]。

3.1 土体表面位移变化规律

土层表面各点的位移时程曲线形状大体相同,本文仅列出水平面内距离轨道 0 m 和 15 m 两点的位移时程曲线(图 3),发现其 Y 方向位移曲线有着相同的规律,并分析了远离轨道 Y 方向位移稳定值的变化规律(图 4)。

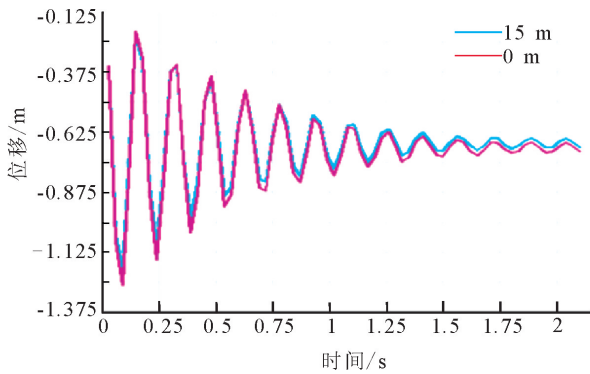


图 3 0 m 和 15 m 两点的位移时程曲线
Fig.3 Time-history curves of displacements at points of 0 m and 15 m from the track

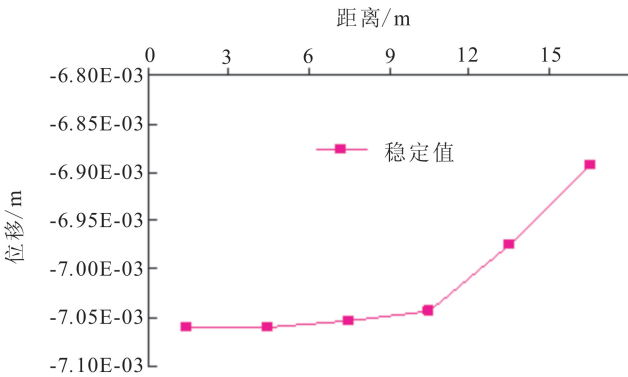


图 4 水平不同位置处振动竖向位移最大值
Fig.4 Maximal vertical displacement at different points in horizontal direction

图 3 和图 4 表明,列车荷载刚施加时会有较大的振动,随着荷载的运行振幅逐渐减小,最后趋于一个稳定值,而且离轨道越近趋于的稳定值越大。

3.2 土体表面加速度变化规律

轨道水平方向上距轨道中心 0 m、3 m、6 m、9 m、12 m 及 15 m 处的加速度时程曲线(图 5)反应了土体振动加速度的水平方向衰减规律。通过比较这几个典型位置点的加速度极值(图 6),发现土体表

面变化具有规律性,稳定值变化不大,但其极值随着远离轨道,变化规律有先增大后减小的趋势。图 6 也表明,在离开轨道 9 m 左右的位置,地表加速度达到极值,表明该处的振动最为强烈。

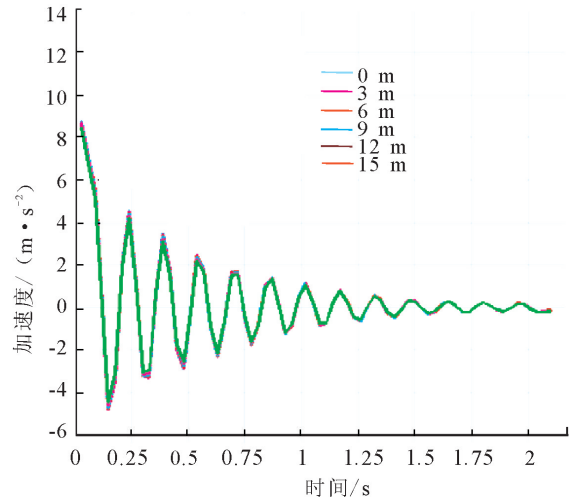


图 5 水平方向上地表加速度时程
Fig.5 Ground acceleration time histories in horizontal direction

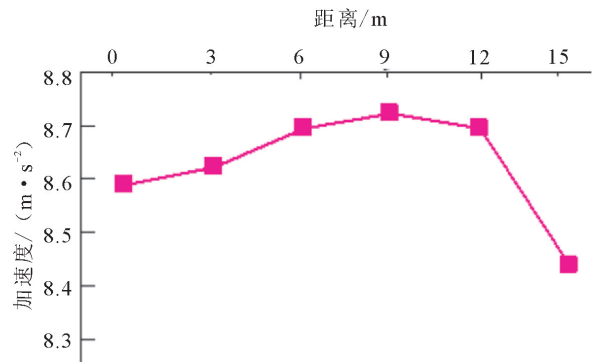


图 6 水平方向上地表最大加速度变化规律
Fig.6 Variation of maximal ground acceleration in horizontal direction

3.3 不同速度下中心点位移和加速度的变化规律

分析荷载运行速度为 80 km/h、120 km/h 和 160 km/h 时土体中心点的位移时程曲线和加速度时程曲线(图 7、图 8)。

上述计算结果表明,随着荷载移动速度的增加,土体中心点位移和加速度有着相似的变化规律。即随着荷载移动速度的增加,位移和加速度的幅值有所增大,但趋向的稳定值变化较小,并最终趋于 0。

4 结论与建议

本文通过数值分析方法研究移动荷载作用下土体的反应规律,主要的结论与建议为:

- (1) 在运动荷载作用下,地面位移沿竖直方向

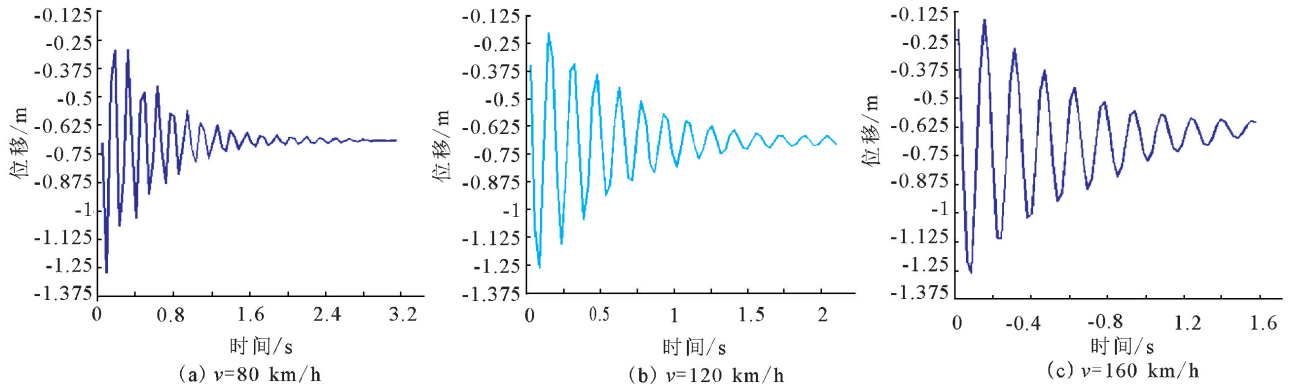


图 7 土体中反应位移与荷载的移动速度

Fig.7 The displacement history and vehicle speed

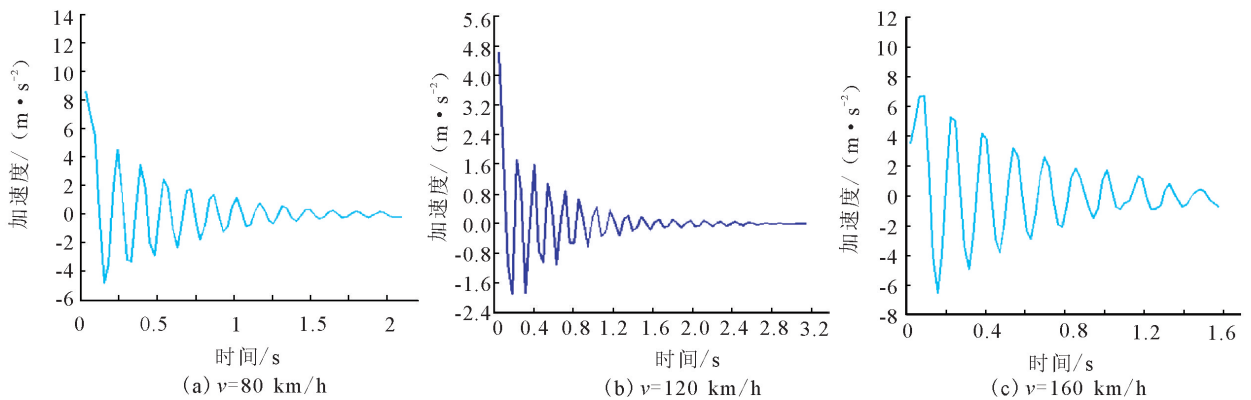


图 8 土体中反应加速度与荷载的移动速度

Fig.8 The accelerations history and vehicle speed

为最大,荷载刚施加时会有一个突变,但是随着荷载的移动会达到一个稳定值,并随着远离荷载,该值逐渐减小[图 8(b),(c)]。

(2) 对于加速度,荷载刚施加时会有一个突变值,随着荷载的移动逐渐趋于零。随着水平面内远离荷载,其稳定值总体趋势是减小的,但是其幅值有个新增后减的规律。

(3) 综合分析位移时程曲线和加速度时程曲线,发现随着速度的增大,竖直方向的位移和加速度的幅值逐渐增大,但是其稳定值变化较小,并趋于 0。

(4) 控制交通振动的隔振装置在一定的区域内应该有效,建议在 8~10 m 范围内设置竖向的隔振装置可能达到最佳的隔振效果。

参考文献(References)

- [1] Gakenheimer D C, Miklowitz J. Transient Excitation of an Elastic Half-space by a Point Load Traveling on the Surface[J]. Journal of Applied Me-chanics, ASME, 1969, 36(72): 505-515.
- [2] Ryba L. Vibration of Solids and Structures Under Moving

Loads[M]. Groningen: Noordhoff International Publishing, 1972, 47(60): 380-389.

- [3] Dieterman H A, Metrikine A. Critical Velocities of a Harmonic Load Moving Uniformly Along an Elastic Layer[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1997, 64(5): 596-600.
- [4] 边学成. 高速列车运动荷载作用下地基和隧道的动力响应分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 39-53.
BIAN Xue-cheng. Dynamic Response of Foundation and Tunnel Under High-speed Train Load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [5] 王贻荪, 王可成, 贺台琼. 圆心位移影响函数法及其在基础振动分析中的应用[J]. 土木工程学报, 1981, 14(1): 3-6.
WANG Yi-shen, WANG Ke-cheng, HE Tai-qiong. The Application of Circle Displacement Effect Function Method in Foundation Analysis[J]. Journal of Civil Engineering, 1981, 14(1): 3-6. (in Chinese)
- [6] 张继强. 移动轨道交通荷载作用下土体动力反应模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
ZHANG Ji-qiang. Simulation of Dynamic Response of Movable Track Load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)