

Vehicle Impact on Asphalt Roadbed Mechanics

Qian LI*, Yan LI

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400067, China

Abstract: The motion of the vehicle is a major cause of road damage. Through on the vehicle dynamics research, to reveal the mechanism of pavement damage, improve pavement structure type, is a hot problem in the study on the current road boundary. For mechanical response under the action of vehicle load and speed of pavement problems, based on the asphalt pavement as the research object, using the dynamic vehicle to simulate the vehicle load and speed on the mechanical response of pavement. Through the model establishment and ANSYS finite element analysis method on the vehicle's impact on pavement mechanics.

Keywords: asphalt pavement; vehicle load; the speed of the car. the finite elemen.

车辆对沥青路面的力学影响

李乾*, 李妍

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400067

摘 要: 车辆的行驶是路面破坏的主要原因。通过车辆对路面的动态性研究, 揭示路面破坏的机理, 改进路面的结构类型, 是当前道路界研究的热点问题。针对车辆荷载和车速作用下路面力学响应问题, 本文以沥青路面为研究对象, 利用动态车辆来模拟车辆荷载和车速对路面力学响应的影响。通过模型的建立和 ANSYS 有限元分析等方法就车辆对路面力学的影响。

关键词: 沥青路面; 车辆荷载; 车速; 有限元

1 引言

随着国民经济和公路交通运输业的快速发展, 车辆运输成为了道路交通的发展趋势, 车辆动荷载和车速是造成路面早期破坏的一个主要原因, 公路的静力法设计越来越难以满足要求。通过车辆对路面的动态性研究, 揭示路面破坏的机理, 改进路面的结构类型, 是当前道路界研究的热点问题。对于路面而言, 其承受的主要荷载时来自于车辆的动荷载。道路路面在车辆动荷载的作用下, 会出现不同程度的破损, 进而影响到道路的使用性能。随着我国交通的快速增长, 车辆速度和车辆荷载的逐渐加大, 对于路面承受荷载能力的要求也是越来越高。同时路面结构并不是承受理想的静载。所以本文模拟路面实际的车辆行驶状态, 对动态车辆作用下沥青路面各层的动态响应进行研究。车辆在行驶的过程中, 往往是人车路相互影响的过程, 所以在本文中建立 1/4 车辆动荷载模型, 利用 ANSYS 有限元软件分析车辆行驶速度和动荷载对沥青路面的影响^[1]。

行车速度对沥青路面的力学参数及响应有重要影响。根据沥青混合料的温度等效原理, 当沥青路面在

高频率车载的作用下, 路面材料的力学参数较低频率荷载下的力学参数的要求要低。这也就是说, 当行车荷载在高频率的作用下, 沥青路面的材料模量将会增大, 这样将会大大有利于路面使用性能的发挥。在工程实践中, 经常有实际的案例证明这一现象, 比如在上坡路段或十字路口经常出现比正常路段严重很多的病害, 就是因为这些特殊路段的行车速度要远小于正常路段。目前, 可以确定的是车辆速度对沥青路面结构是有一定的影响的, 但是影响度是怎么样的还有待进一步的考究。本文将对该问题进行定量的研究。

2 路面力学响应研究现状

国外专家对路面力学模型进行了大量的研究工作, 一般地基假定为弹性或者粘弹性体, 面层为地基上的弹性板体。Seong-Min^[2]通过 Fourier 变换, 分别分析了弹性板体在移动恒载、瞬态和稳态正弦动荷载作用下动力的响应; M.-H.Huang^[3]利用条分法分析了弹性板体的动态响应, 并且分析了移动速度、地基的刚度对动载的影响程度; CebonD^[4]通过振动理论, 考虑随机荷载作用下的路面脉冲响应, 研究相应的路面响应问题; T.D. Gillespie^[5]等研究了在不同车辆

载重用下路面破坏问题，分析了车辆结构参数对动荷载以及路面动力响应的问题；Bassam Saad^[6]通过建立不同材料的基层、底基层模型，加载三角波形荷载，分析了沥青面层底部最大拉应力和路基顶部最大压应力。国内专家在路面动力学方面也做了很多研究。孙璐、邓学钧^[7]研究了在无限大板上作用随机点源荷载的一般解，结论表明作用移动的平稳随机荷载，无限大板的动力响应是非平稳的；朱孔源^[8]利用有限元数值解析，分析了动载作用下的路面响应问题，并根据轮胎动载的特性设计了轮胎动载测试装置；郝大力^[9]等利用有限元模型和数值计算，研究了层状体系路面结构在 FWD 和车轮荷载的作用下的动力响应问题，并分析了一般规律；耿大新、钟才根等^[10]根据路面在行车荷载下的变形受力特性，把车路作用系统简化为冲击荷载下二维平面板的力学响应，分析了行车荷载对路面的受力解析解；舒富民、钱振东^[11]建立了沥青路面的三维模型，并施加移动荷载作用，分析了移动荷载下路面各层的受力响应问题。

3 车轮动载对路面动态的响应影响

3.1 车辆震动模型

汽车是一个复杂的多自由度震动系统，要描述汽车的实际震动性状是一个复杂的问题。采用单自由度车辆震动模型来计算和分析车辆的震动水平，如图 1 所示。单自由度系统受迫震动的运动微分方程： $M \cdot Y''(t) + c \cdot u'(t) + k \cdot u(t) = 0$ 。各量之间应该满足以下的关系：

$$u(t) = Y(t) - y(t)$$

$$u(t) = f(t)$$

$$f(x) = a \cdot \sin(w' \cdot x) = a \cdot \sin(w' \cdot v \cdot t)$$

对车辆的震动方程进行求解，可以得到：

$$u(t) = (w' / w \cdot v)^2 R_d \cdot a \cdot \sin(w \cdot v \cdot t - \Phi)$$

设 $F_d(t) = c \cdot u'(t) + k \cdot u(t)$

最终确定：

$$F_d(t) = (w / w \cdot v)^2 R_d \cdot a \{ c \cdot \sin(w \cdot v \cdot t - \Phi) - w \cdot k \cdot \cos(w \cdot v \cdot t - \Phi) \}$$

其中：

$$R_d = \frac{1}{\{ 1 - (w' / w \cdot v)^2 + (1x \cdot (w \cdot v)^2)^2 \}}$$

$$x = \frac{c}{2M \cdot w}, \quad w = \left(\frac{k}{M} \right)^{0.5}$$

M,m-模拟车辆的各部位质量

k - 车架体系的刚度/N · m⁻¹

c - 车架体系的阻尼/N · s · m⁻¹

Y(t)-车架体系在垂直方向的位移

y(t) - 路面不平度给车辆的激励

u(t) - 悬架与轮胎间的相对运动方程

f - 相位角

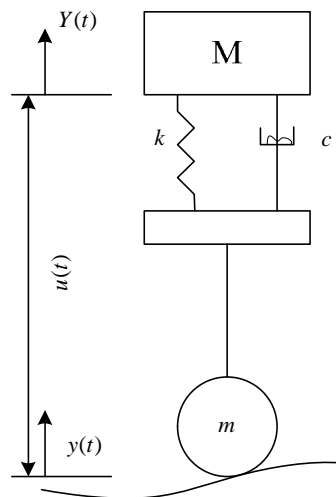


图 1. 单自由度 1/4 车辆震动模型

3.2 路面结构三维有限元模型的建立

3.2.1 单元类型选取

本文选用 ANSYS 单元库中的 SOLID45 建立路面结构的三维弹性有限元模型。SOLID45 单元为 3D 实体结构单元，由八个节点组成，每个节点具有三个沿 x、y、z 三个方向的平移自由度，此单元可以对应力、剪力和拉应力进行分析。

3.2.2 有限元模型的建立

当分析研究沥青路面结构时，一般会假定路面各层为平面无限大的弹性层，路基为弹性半空间体。但是采用有限元计算时，无法将模型的尺寸取为无穷大，只能在建立模型时尽量将模型的尺寸取得大一些，但尺寸过大，就会增加很多计算工作量，因此要合理确定其计算模型的尺寸，使其在保证计算精度的同时，又不增加过多的计算工作量^[12]。经过多次方案比选后，本文选取的模型尺寸(x, y, z)为 6m×6m×5.5m，其中 x 轴为路面纵向，y 轴为路面横向，z 轴为路面深度方向。路面模型采用由下到上的顺序逐层建立。先建立表面层 z=0 的顶面，然后沿 z 轴向下拉伸

6m 形成土基，在此基础上依次向上拉伸建立底基层、基层和面层，其中土基、底基层、基层和面层均采用 SOLID45 单元。各层之间满足接触面完全连续的假定。在实际中轮胎作用于路面的形状更接近于矩形，且随荷载的增加，矩形形状越明显^[13]，故本文以单轴双轮载作用的范围简化为矩形，并施加半正弦冲击荷载。在划分网格时，在行车荷载的作用区域做网格划分加密处理，而远离行车荷载作用区域网格划分逐步加大，面层、基层和底基层网格划分较密，而土基粗化。整个模型共形成 13175 个节点，12240 个单元。

3.3 边界条件的确定

路面模型模拟分析前，施加的边界约束是影响计算结果的重要因素。由于车辆轮胎直接作用在道路表面，在路面结构深度方向上，土基距路表较深而且层厚大，土基几乎没有任何响应；根据不同的道路断面形式，以及路面结构不产生滑移和结构破坏的前提下，路面两侧只承受不同的土体压力；行车方向上，距轮胎荷载作用点的无限远处，几乎没有动力响应。所以路面结构的边界条件为：土基的底面为固定面，横向两个与 x 轴平行的断面 y 方向的位移被约束，纵向两个与 x 轴垂直的断面 x 方向的位移被约束^[14]。

3.4 路面结构参数

沥青混凝土是典型粘弹性材料，由于荷载的瞬时性传统的路面设计方法都将路面材料视为线弹性材料，路面材料模型为线弹性模型。本章以厦门公路路面结构为依据，路面材料参数，如表 1。

表 1. 路面模型设计参数

层位	层厚 (m)	弹性模量 (MP)	泊松比	密度	阻尼率
沥青面层	0.18	1200	0.35	2613	0.05
半刚性基层	0.2	1100	0.35	2083	0.05
半刚性底基层	0.25	600	0.4	1932	0.05
土基	4.77	40	0.35	1926	0.05

3.5 有限元计算结果及分析

3.5.1 路面结构垂向应力分析

图 2、图 3 和表 2 分别体现了竖向应力随时间和路面深度的变化规律：

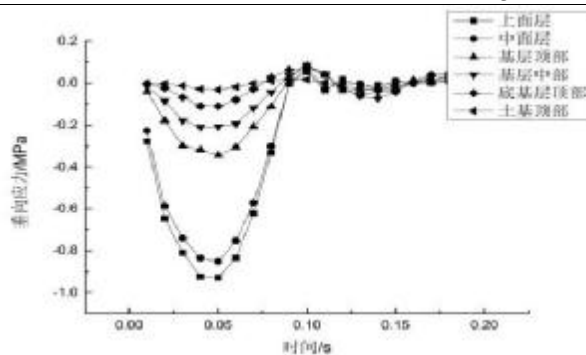


图 2. 路面各层位的垂向应力时程曲线图

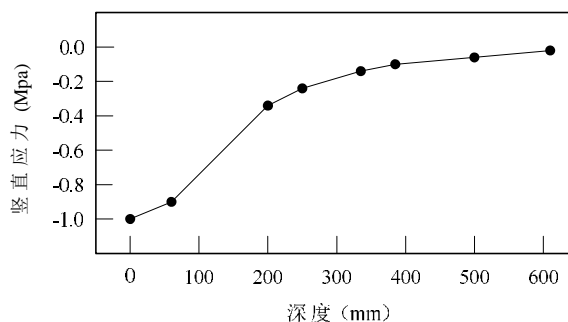


图 3. 路面垂向应力沿深度方向变化曲线

由图 2 和图 3 可知，路面在车辆动载的作用下，对路面的垂向应力主要是呈现压力。这种压力随着深度的不同，也存在着极大的变化。车辆动载垂向应力对路面影响最大的结构层是上面层和中面层。对于土基的影响基本上是不存在的。

表 2. 各层轮载中心点垂向最大应力统计

深度/m	0	0.06	0.18	0.28	0.48	0.73
最大应力/MPa	-0.90	-0.83	-0.34	-0.20	-0.13	-0.05

表 2 统计了路面各层竖向应力的最大值，可以看出沥青路面路基上的竖向应力仅为上面层的竖向应力的 1/2。车辆动荷载所产生的竖向应力是主要集中在路面的表面。路面往往是一个较为薄弱的地区，随意在路面结构设计，要尽可能的去加大路面的厚度以及选用路用性能好的材料使用在路面的表面层。

3.5.2 路面结构横向应力分析

图 4、图 5 和表 3 分别体现了横向应力随时间和路面深度的变化规律：

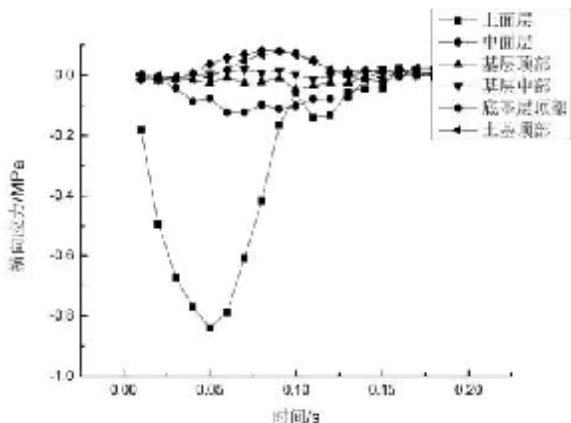


图 4. 路面各层位的横向应力时程曲线图

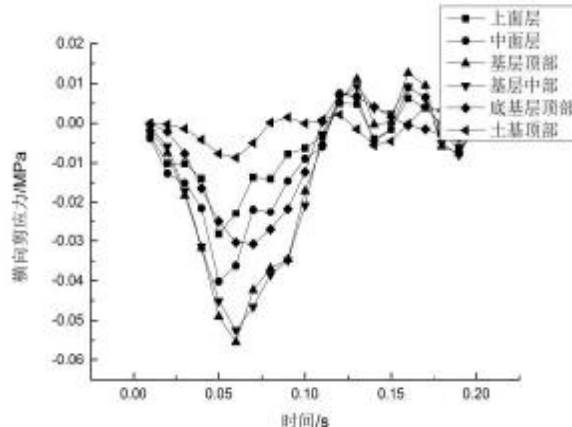


图 6 各层轮迹中心横向剪应力时程曲线图

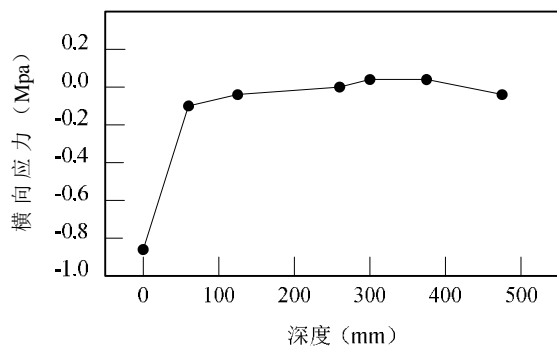


图 5. 路面横向应力沿深度方向变化曲线

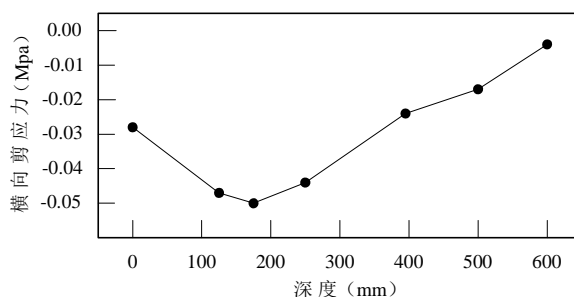


图 7 各层轮迹中心横向剪应力沿深度方向变化曲线

由图 4 和图 5 可以表明纵向应力和横向应力的变化趋势大致相同，表面层的横向应力最大，随着深度的增长，横向应力值将会锐减；

表 3. 各层轮载中心点处最大横向应力统计

深度/m	0	0.06	0.18	0.28	0.48	0.73
最大应力/MPa	-0.80	-0.13	-0.047	0.020	0.07	0.075

表 3 随着路面深度的不断增加横向应力先增大后趋于平稳；当路面深度到基层 0.06m 时，横向拉应力基本上趋近于零，最大的横向应力出现了路的表面层。这就表明了，在沥青路面的表层是最容易受到横向应力的影响，且深度越深影响越小。

3.5.3 路面结构横向剪应力分析

在夏季高温情况下，重载车辆轮胎作用于路表，容易形成明显的车辙破坏，为探究车辙形成时应力状态，分别研究了轮迹中心的横向剪应力的变化趋势，如图 6，图 7 所示。

由图 6 和图 7 可以看出，车辆行驶时，在轮迹中心各层的横向剪应力呈正负交变的状态，而且基层的横向剪应力较大。横向剪应力的变化的正负交替的趋势并不明显，路面各层主要出于负剪应力状态，横向剪应力最大值还是出现在基层。

4 行车速度对路面动态的响应影响

通过对沥青路面动力响应的各力学指标分析和比较，知道沥青路面结构受力最不利的位置为沥青面层和基层底部，故本文将选取面层的最大竖向位移，最大垂直压应力，最大水平剪应力和基层底部的最大水平拉应力为研究对象，并依次改变车速为 0m/s，10m/s，20m/s，30m/s，40m/s 和 50m/s，分析其对在车辆移动荷载作用下沥青路面结构最大竖向位移，最大垂直压应力，最大水平剪应力和基层底部的最大水平拉应力等力学指标的变化，通过定量的分析去发现车速对于路面结构的影响。

4.1 有限元模拟结果分析

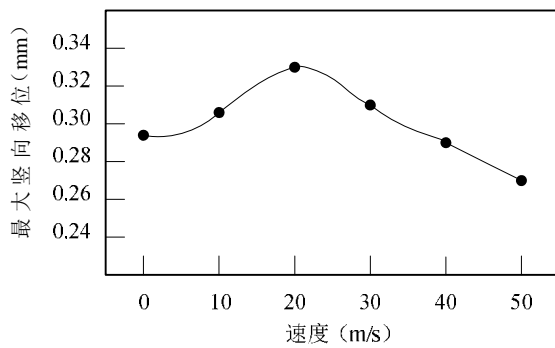


图 8. 不同车速时面层最大竖向位移

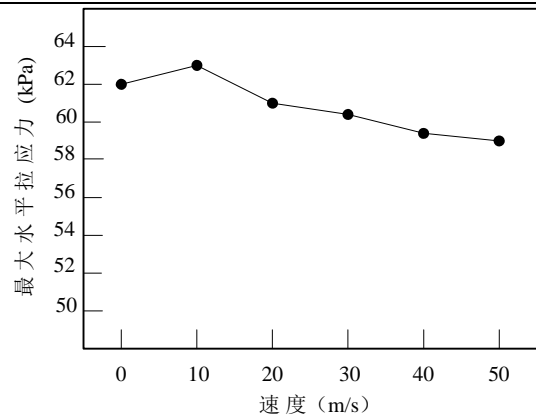


图 11 不同车速时基层最大水平拉应力

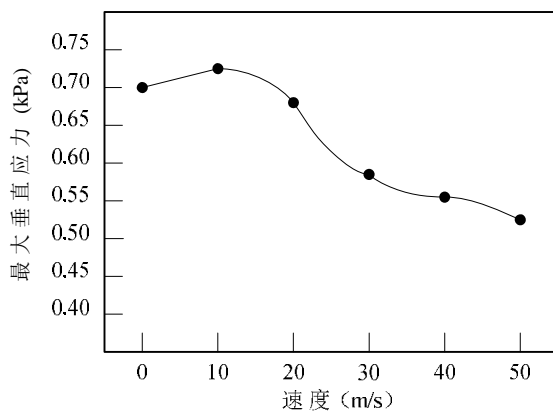


图 9. 不同车速时面层最大垂直应力

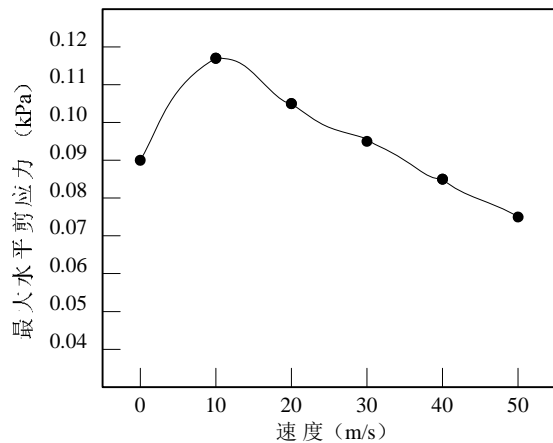


图 10. 不同车速时面层最大水平剪应力

从图 8 到图 11 可以看出, 当车速增大时, 沥青路面面层的最大竖向位移, 最大的垂向应力, 最大的水平剪应力和及基层底部的水平拉应力均是先增大后减小的变化形式。这表明汽车的行驶速度可以影响着路面各层应力的变化, 但是随着速度的增加, 其增大和减小的幅度也是明显不同的。对于沥青层面层最大的竖向位移和面层的最大水平剪应力而言, 随着速度的增加, 其应力的增加幅度和减小的幅度是比较明显的, 是快速的增加和减小。以面层的水平剪应力为例, 在车速 20m/s 到 30m/s 时, 存在着一临界速度, 在该速度的情况下, 沥青面层的水平剪应力将达到峰值。所以, 汽车在行车的时候, 要尽可能的避免该速度。

5 结论

1) 在车辆动荷载的作用下, 沥青路面在垂向和横向上, 路面面层都处于受压状态, 而且在面层内部还存在着大量剪应力, 这也是沥青面层破坏的主要原因; 在路面基层深度以下, 纵向和横向上都处于受拉状态, 并且最大垂向拉应力和最大横向拉应力都发生在底基层与土基的结合部, 因此路面结构的基层和底基层是主要的受拉层。

2) 不同车速下, 车辆的行驶对沥青路面结构层的影响是不同的。随着车速的增大, 沥青路面的最大竖向位移, 最大垂直压应力和最大水平剪应力力学的变化是比较明显的。就车速对路面的影响而言, 随着车速的增大, 往往会存在一个临界值使得更方面的应力达到极值。

References

[1] 任瑞波, 祁文洋, 李美玲. 移动荷载作用下饱和沥青路面动

- 力响应三维有限元分析 [J]. 公路交通科技, 2011,28(9):11-16
- [2] Seong-Min Kim, Jose M Roeset. Moving Loads on a Plate on Elastic Foundation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998
- [3] M-H Huang, D P Thambiratnam, F Asce. Dynamic Response of Plates on Elastic Foundation to Moving Loads[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002
- [4] Cebon D. An investigation of the Dynamic Interaction Between wheeled Vehicles and Road Surfaces[D]. PhD Thesis, University of Cambridge, 1985
- [5] T D Gillespie, S M Karamihas, Mw Sayers, et al. Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance[J]. TRB Report 353, National Academy Press, 1993
- [6] Bassam Saad, Hani Mitri, Hormoz Poorooshab. Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005,131(6): 460-469
- [7] 孙璐, 邓学钧. 弹性基础无限大板对移动荷载的响应[J]. 力学学报, 1996, (06): 117-121
- [8] 朱孔源. 车辆-柔性路面力学相互作用系统的研究[D]. 中国农业大学, 2001
- [9] 郝大力, 王秉纲. 路面结构动力响应分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(3): 9-12
- [10] 耿大新, 钟才根, 杨林德等. 行车荷载作用下刚性路面结构体系的动力响应[J]. 中南公路工程, 2003, 28(4): 16-19, 38
- [11] 舒富民, 钱振东. 移动荷载作用下沥青路面的动力响应分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5(3): 90-95
- [12] 王乾. 沥青路面结构荷载应力有限元分析[D]. 西安建筑科技大学, 2006.
- [13] 殷立文, 丁静声. 荷载接触面形状对沥青路面力学响应的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 04: 544-547
- [14] 李正明, 郭鑫, 张思远. 动载作用下高速公路半填半挖路基动力响应 [J]. 公路工程, 2014, 01: 126-130