

doi:10.3969/j.issn.1674-0696.2014.05.15

货车对不平整路面的动荷载分析

魏连雨,杨政龙,李思倩

(河北工业大学 土木工程学院,天津 300401)

摘要:针对货车动荷载与路面结构力学响应之间的关系问题,在沧州干线公路上利用 SM2000C 动态称重仪对满载和超载情况下的试验车在不同车速和路面平整度工况下的实际动荷载情况进行了试验数据采集分析。同时采用半波正弦动荷载加载,应用 ABAQUS 有限元软件建立了相应的三维路面结构模型进行动态模拟,并与试验所测动荷载值进行了比配分析。结果表明:该模型能够很好地模拟货车通过一定路面结构时的动荷载变化情况,可以应用于工程实际。

关键词:道路工程;动荷载;平整度;动态模拟;有限元

中图分类号:U491.2⁺5

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2014)05-070-03

Truck Dynamic Load on Uneven Pavement

Wei Lianyu, Yang Zhenglong, Li Siqian

(School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract:In response to the question of the relationship between the truck dynamic load and pavement structure mechanical response, the SM2000C dynamic weighing instrument was used to collect and analyze the test data of the actual dynamic load of the cars in the full load and overload situation with different speed on Cangzhou arterial highway. ABAQUS finite element software was applied to establish a three-dimensional pavement structure model for dynamic simulation using half-wave sinusoidal dynamic load, and the simulation results were compared with the dynamic load values measured by test. The results show that, the proposed model can well simulate the dynamic load changes of the truck crossing through a certain pavement structure, which can be applied to actual engineering.

Key words:road engineering;dynamic load;flatness;dynamic simulation;finite element

随着中大型货车比例的不断增加,且车辆超载现象越来越严重,由路面不平度所引起的不同速度下的动态荷载成为了道路使用性能和寿命所必须考虑的因素之一。笔者采用多层弹性路面结构,采用有限元法对车辆动荷载及路面结构力学响应规律进行了模拟研究^[1]。

1 动荷载试验介绍

本次试验在 G307 公路沧州崔尔庄段进行,动荷载称重仪器采用 SM2000C 动态称重仪,该仪器主要由道路称板和内部采集输出设备两部分组成。

试验车选用的是同型号三轴货车在满载(30 t)和超载(42 t)状态下不同车速的动荷载情况,每次试验车运行都是在单车道均匀车速通过动态称重仪称板,且在试验前已经通过试验车对动态称重仪进行了标定设置,数据为实际车辆对路面的荷载作用值,采集的具体试验数据如表 1。

表 1 动荷载试验数据

Table 1 Dynamic load test data

满载(30 t)		超载(42 t)	
车速/(km·h ⁻¹)	动荷载/t	车速/(km·h ⁻¹)	动荷载/t
16.4	10.550	20.2	13.90
18.0	10.850	24.2	13.60
20.1	10.850	25.6	13.80
26.1	10.325	26.4	13.75
27.4	10.275	27.4	13.67
28.7	10.100	32.8	13.25
30.1	10.250	33.0	13.25
34.3	9.950	33.6	13.10
43.5	8.970	34.5	12.95
44.8	9.000	36.8	12.90
46.6	9.000	41.3	13.15
51.4	8.900	44.0	13.10
54.5	8.700	45.7	13.14
55.4	8.500	49.0	13.00
56.8	8.400	52.5	12.95
59.1	8.150	53.4	12.85

收稿日期:2013-05-17;修订日期:2013-06-18

第一作者:魏连雨(1957—),男,天津人,教授,主要从事交通及道路方面的研究。E-mail:wly57@126.com。

2 动荷载有限元模拟

2.1 荷载模型及参数

采用连续的半波正弦曲线作为动力加载函数来模拟实际汽车荷载,其表达式为^[2-6]:

$$P(t) = P_0 + P\sin(\omega t) \tag{1}$$

式中: P_0 为车辆静载,取车辆单边轮载,kN; P 为振动荷载幅值, $P = M_0\mu\omega^2$ [M_0 为车辆模型簧下质量, ω 为振动圆频率, $\omega = 2\pi v/L$, v 为车速, L 为路面几何曲线波长; μ 为路面几何不平顺失高(按国际高速公路平整度指数取值)]。

满载 30 t(超载 42 t)三轴货车其具体荷载计算参数如表 2。

表 2 荷载计算参数
Table 2 Load calculation parameter

计算参数	前轴取值	后轴取值
P_0/kN	3.95(7)	11.05(14)
$\omega/(\text{s}^{-2})$	$2\pi v/L$	$2\pi v/L$
M_0/kg	280	250
μ/mm	15	15
L/m	3	3

2.2 有限元模型参数

基于弹性层状体系理论,对沧州市典型省道路面结构进行模拟分析,路面结构和相应材料参数如表 3。

表 3 路面结构材料参数
Table 3 Pavement structure material parameters

材料参数	罩面	沥青混凝土	二灰碎石	土基
厚度/cm	4	8	16	—
弹性模量/MPa	1 400	1 200	1 300	40
密度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	2.4	2.4	2.3	1.8
阻尼率/%	0.05	0.05	0.05	0.05
泊松比	0.35	0.30	0.25	0.40

2.3 模型的建立

经过多次调试比较后,在保证计算精度的基础上,确定了三维模型的大小尺寸分别为长(Z 方向)8 m、宽(X 方向)8 m、高(Y 方向)5 m^[7];车速取现场试验车所测实际车辆速度;单侧双轮轮胎当量接触^[8]为 0.24 m²,轮胎接地压力^[9]为 0.7 MPa;平整度为现场所测实际道路平整度值 15 mm/3 m,具体路面有限元结构模型如图 3。

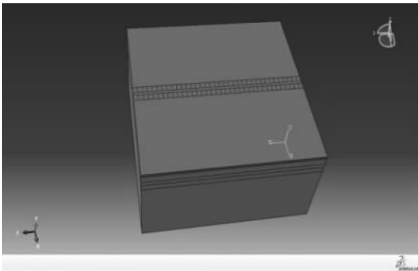


图 3 路面结构模型

Fig.3 Pavement structure model

平整度按照国际平整度指数 IRI 来表示,根据

道路表面形状和缺陷(凹陷、搓板和坑槽),行驶感觉(可感受到的起伏不平 and 剧烈运动)和行驶速度(在干燥和直路上无交通拥挤状况下通常可行驶的速度)对路面做出了相应的平整度等级如表 4。

表 4 平整度等级
Table 4 Smoothness grade

平整度范围/ $(\text{m} \cdot \text{km}^{-1})$	描述性规定
1.5 ~ 2.5	车速超 120 km/h 时仍舒适,车速在 80 km/h 时很少感到起伏不平。无凹陷、坑槽或搓板;三米尺平整度 <2 mm
4.0 ~ 5.3	车速达 100 ~ 120 km/h 时仍舒适,在 80 km/h 时可能感到中等或大的起伏不平。中等搓板或大的起伏不平;三米尺平整度 5 ~ 15 mm
7.0 ~ 8.0	车速达 70 ~ 90 km/h 时仍感舒适。强烈的起伏不平或搓板;三米尺平整度 15 ~ 20 mm
9.0 ~ 10.0	车速达 50 ~ 60 km/h 时仍感舒适。有频繁的凹槽和修补或坑槽;三米尺平整度 20 ~ 40 mm
11 ~ 12	车速必须降到 50 km/h 以下。许多深凹陷和坑槽;三米尺平整度 40 ~ 80 mm

3 模拟结果分析

3.1 试验车模拟结果及分析

通过对 30 t 和 42 t 试验车与路面力学响应模拟得到相应的路面正压力值,并换算成车辆动荷载值与 SM2000C 动态称重仪所测现场数据进行匹配分析。图 4(a)为 30 t 试验车模拟动荷载与实际检测数据匹配;图 4(b)为 42 t 试验车模拟动荷载与实际检测数据匹配。

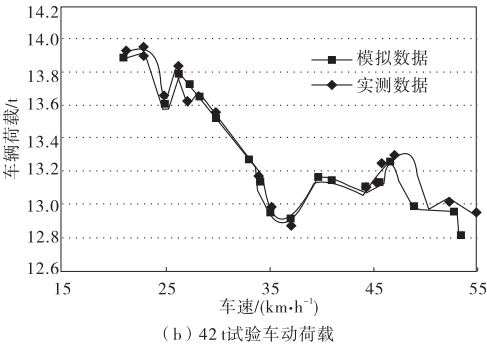
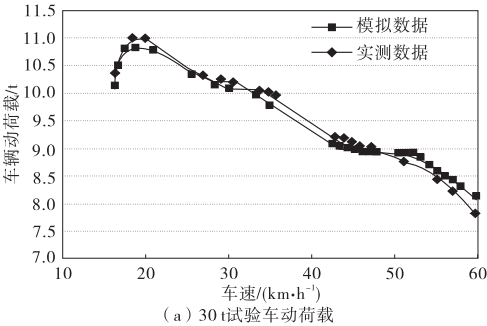


图 4 试验车动荷载

Fig.4 Dynamic load of testing car

由图4可知,模拟与实测数据基本吻合,文中有限元模型可以很准确的模拟实际货车行驶时对道路的动荷载情况。对于不同车速下动荷载的变化情况,30 t 试验车动荷载在 20 km/h 之前是随着车速增大而增长的,在其之后随着速度增大动荷载基本保持一定范围内的速率降低的趋势,动荷载总共降低了约 24.8%;42 t 超载试验车在 27 km/h 之前和 36 km/h 之后动荷载经历了多次增减起伏,表现较为不稳定,但动荷载在整体上是随着速度增大而起伏减小的,动荷载总共降低了约 7%。由此可以看到,超载车对路面的动荷载随着速度的变化比满载车要不稳定的多,且降低的比例要小,必然对路面造成的破坏作用要大。

3.2 平整度影响模拟分析

对试验道路固定平整度(15 mm/3 m)下的模拟分析,现按照前面介绍的平整度等级不断改变道路的平整度,分析 42 t 超载试验车在不同平整度情况道路上行驶时的动荷载变化情况,具体动荷载随着平整度等级的变化如图5。

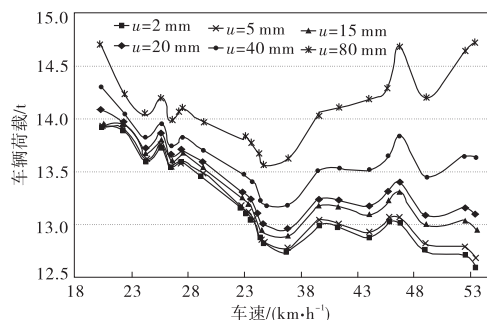


图5 平整度影响下动荷载变化情况

Fig. 5 Dynamic load changes under the influence of flatness

由图6可以得到各平整度等级下的动荷载变化情况有明显不同。各个平整度下动荷载随着速度的增大都还保持着原有的增减起伏特点,但当平整度大于 40 mm 以后,当速度增大到 36 km/h 之后,动荷载从原来的降低趋势变为了增长,且随着平整度的增长,其动荷载增长趋势越来越大,以至于其值开始高于较低速度时的峰值。由此可以看到平整度对于货车对道路的动荷载变化作用效果很大,平整度越好的道路同样车况下对道路的破坏作用较小,随着平整度的变差,对路面的破坏也就慢慢变大,由原来的速度越大荷载作用越小变为速度越大荷载作用越大的情况,所以保持道路平整度平顺是很有必要的。

4 结 论

1) 采用的动力曲线函数和路面有限元模型可以很好的模拟实际货车对路面的动荷载作用情况。对

于同一路面平整度下,满载车随着速度的增大处于匀势的下降;而超载车随着速度的增大不断的出现增减起伏的不稳定趋势,这就造成较未超载车在较高速度时产生相对更大的动荷载作用,对路面产生更大的破坏。所以严格控制车辆超载对于保护路面寿命是很有必要的。

2) 对于超载车在不同平整度等级道路下的动荷载变化可以看到随着平整度的变差,货车动荷载起初随着速度的增大变化趋势基本一致,但当增大到 36 km/h 之后随着速度增大,平整度差的道路所产生的动荷载开始变为主要的快速的增大趋势,以反较好平整度下动荷载为整体下降的趋势,而变为随车速增大不断增长的情况。因此,道路的平整程度对于车辆对路面动荷载作用大小有很大的影响,特别是在高速情况下,不同平整度等级下差别很大,在道路建设时应更加重视路面平整程度,以延长道路使用寿命和车辆行驶舒适程度。

参考文献(References):

- [1] 邓学钧,张登良. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
Deng Xuejun, Zhang Dengliang. Subgrade and Pavement Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 邓学钧,孙璐. 车辆-地面结构系统动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
Deng Xuejun, Sun Lu. System Dynamics of Vehicles-Ground Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [3] 兰辉萍,李德建. 高速公路路基的动力响应分析[J]. 西部探矿工程,2003,15(8):160-162.
Lan Huiping, Li Dejian. Dynamic response analysis of freeway subgrade [J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(8): 160-162.
- [4] 向坤山. 动载作用下半刚性路面动力响应的三维有限元模拟[J]. 湖南交通科技,2006,32(3):53-55.
Xiang Kunshan. Dynamic response of rigid pavement under dynamic loads by three-dimensional finite element simulation [J]. Human Communications Technology, 2006, 32(3): 53-55.
- [5] 周长峰,孙蓓蓓,孙庆鸿. 铰接式自卸车悬架系统动力学建模与仿真[J]. 汽车技术,2004,35(9):15-18.
Zhou Changfeng, Sun Beibei, Sun Qinghong. Modeling and simulation of harshness of an articulated tipper [J]. Automobile Technology, 2004, 35(9): 15-18.
- [6] 黄雪娇,曹源文,李仕峰. 基于 ADAMS 重型半挂车动荷载仿真分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(1):128-132.
Huang Xuejiao, Cao Yuanwen, Li Shifeng. Simulation analysis on dynamic loads of heavy-duty semitrailer model based on ADAMS [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(1): 128-132.
- [7] 廖公云,黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].

(下转第156页)

太明显。在其他参数相同的情况下,摩擦片的弹性模量在一定范围内也与 T_{\max} 存在近似线性关系。

3 结 论

1) 重载盘式制动器制动结束时,制动副的温度场沿周向分布,并在径向和轴向有较大的梯度,摩擦片在运动方向后部有较大的热量集中。

2) 制动过程的最高温度出现在制动中段后期,制动初期摩擦片温升较快,制动盘温度场受振动影响较大,在制动后期,制动盘与摩擦片的最高温度逐渐趋于一致。

3) 制动过程的最高温度 T_{\max} 与整车质量、初始速度和材料的弹性模量存在近似线性关系,且初始速度影响较大;制动快慢对 T_{\max} 影响较小。

参考文献(References):

- [1] Choi J H, Lee I. Finite element analysis of transient thermo-elastic behaviors in disk brakes [J]. *Wear*, 2004, 25: 47-58.
- [2] Cho C, Ahn S. Transient thermo-elastic analysis of disk brake using the fast fourier transform and finite element method [J]. *Journal Thermal Stresses*, 2002, 25: 215-243.
- [3] 林谢昭, 高诚辉, 黄健萌. 制动工况参数对制动盘摩擦温度场分布的影响[J]. *工程设计学报*, 2006, 13(1): 45-48.
Lin Xiezhao, Gao Chenghui, Huang Jianmeng. Effects of operating condition parameters on distribution of friction temperature field on brake disc [J]. *Journal of Engineering Design*, 2006, 13(1): 45-48.
- [4] 黄健萌, 高诚辉, 唐旭晟, 等. 盘式制动器热-结构耦合的数值建模与分析[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(2): 145-151.
Huang Jianmeng, Gao Chenghui, Tang Xusheng, et al. Numerical modeling and analysis of the thermal-structure coupling of the disc brake [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(2): 145-151.
- [5] Gao C H, Lin X Z. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three dimensional model [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2002, 12: 513-517.
- [6] Altuzarra O, Amezuza E, Aviles R. Judder vibration in disc brakes excited by thermo-elastic instability [J]. *Engineering Computations*, 2002, 19(4): 411-430.
- [7] Jacobsson H. Disc brake judders considering instantaneous disc thickness and spatial friction variation [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2003, 217(5): 325-342.
- [8] 刘莹, 周启兴. 盘式制动器摩擦温度场的数值模拟[J]. *南昌大学学报:理科版*, 2012, 34(3): 258-263.
Liu Ying, Zhou Qixing. Simulation of the friction temperature field for disc brake [J]. *Journal of Nanchang University: Engineering & Technology*, 2012, 34(3): 258-263.
- [9] 张立军, 刁坤. 面向热机耦合特性分析的制动器摩擦特性模型[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2011, 39(11): 1680-1686.
Zhang Lijun, Diao Kun. Friction modeling for thermo-mechanical coupling characterization of disc brake [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(11): 1680-1686.
- [10] 孟德建, 张立军, 余卓平. 初始端面跳动对制动器热机耦合特性的影响[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2012, 40(2): 272-280.
Meng Dejian, Zhang Lijun, Yu Zhuoping. Impacts of initial SRO on thermo-mechanical coupling characteristics of disc brake [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(2): 272-280.
- [11] 何建成, 张文明, 姜勇, 等. 基于 ABAQUS 的湿式多盘制动器温度场数值模拟分析[J]. *矿山机械*, 2012, 40(10): 29-33.
He Jiancheng, Zhang Wenming, Jiang Yong, et al. Digital simulation and analysis on temperature field of wet multi-disc brake based on ABAQUS [J]. *Mining & Processing Equipment*, 2012, 40(10): 29-33.

(上接第72页)

- 南京:东南大学出版社,2008.
- Liao Gongyun, Huang Xiaoming. Application of ABAQUS Finite Element Software in Road Engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [8] 单景松, 黄晓明, 廖公云. 移动荷载下路面结构应力响应分析[J]. *公路交通科技*, 2007, 24(1): 10-13.
Shan Jingsong, Huang Xiaoming, Liao Gongyun. Dynamic response analysis of pavement structure under moving load [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(1): 10-13.
- [9] JTG D 50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.
JTG D 50—2006 Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.