

文章编号:1005-0523(2009)06-0021-05

车辆动荷载下沥青路面力学响应分析

袁美俊¹,纪小平²,邢钦玉³,张波²

(1.江苏省交通技师学院,江苏 镇江 212006;2.长安大学公路学院,陕西 西安 710054;
3.路桥华东工程有限公司,上海 200135)

摘要:为了分析路面结构在行车动荷载作用下的力学响应,建立了单自由度1/4车辆模型和以正弦曲线模拟路面不平整度的模型,通过将不同路面状况和行车速度的组合,分析车辆在各情形下所产生的动荷载,发现路面传给车辆的激励振动频率接近车辆自身振动频率时,车辆对路面产生的动荷载值最大。采用ANSYS静态和瞬态三维有限元方法,计算车辆在静态以及不同速度、不同路面状况下沥青路面面层层底水平拉应变和面层内最大压应变,总体来看采用静态荷载进行路面结构设计是偏安全的。

关键词:移动荷载;沥青路面;三维有限元;车速

中图分类号:U416.01

文献标识码:A

国外研究人员通过试验场的测量,得出移动荷载对路面造成的应力、应变要比静态荷载作用下减小50%以上^[1],可见动荷载作用下,沥青路面结构的应力应变大小及变化规律同静载作用时有很大区别。国内很多学者考虑到路面不平整度和车速等因素造成车辆不同程度的振动,车辆振动时对路面产生附加动荷载,从而路面的受力就有大于静载的情况出现。有学者怀疑采用静态荷载作为路面设计荷载的安全性,所谓动荷载是指荷载的大小、方向、作用点随时间变化,不能够仅仅通过动荷载与静态荷载值的大小比较得出路面在何种状态下不利。考虑最不利动荷载不仅要考虑其值的大小,也要考虑其作用点的移动。本文将通过最不利动荷载与静荷载对路面产生的力学响应的比较,来确定路面在何种条件下是不利的。

1 路面不平整度的模拟

模拟车辆振动激励的路面不平整度模型有很多,其中以路面平整度数据建立正弦波路面表面模型^[2]比较常用。假设路面纵剖面表面高程沿路线纵向距离 x 的函数为 $f(x)$,取路面为正弦波形表面,则表面高程函数 $f(t) = a \cdot \sin(w \cdot t)$ 式中, a —振幅, w —角频率, $w = 2v \cdot \pi / \lambda$, v —速度, λ —波长。

根据《公路沥青路面设计规范》中对路面平整度的要求,本文选取 $a = 0.006$ m,实际情况中,路面的不平整度是随机的,很难确定波长。在研究中主要考虑汽车可能产生共振的最不利情况,故拟定波长范围为2~30 m。

2 车轮动载分析

汽车是一个复杂的多自由度振动系统,要描述汽车的实际振动性状是一个很复杂的问题。采用单自由度车辆振动模型来计算和分析车辆的振动水平,如图1所示。单自由度系统受迫振动的运动微分方程: $M \cdot Y''(t) + c \cdot u'(t) + k \cdot u(t) = 0$ 。各量之间满足以下关系, $u(t) = Y(t) - y(t)$, $y(t) = f(t)$, $f(x) = a \cdot \sin(w' \cdot x) = a \cdot \sin(w' \cdot v \cdot t)$ 。

对车辆的振动方程进行求解^[3],可得到 $u(t) = (w' / w \cdot v)^2 R_d \cdot a \cdot \sin(w \cdot v \cdot t - \varnothing)$

设 $F_d(t)$ 为车辆振动产生的动荷载,则 $F_d(t) = c \cdot u'(t) + k \cdot u(t)$ 。最终确定:

$$F_d(t) = (w' / w \cdot v)^2 R_d \cdot a \{ c \cdot \sin(w \cdot v \cdot t - \varnothing) - w \cdot k \cdot \cos(w \cdot v \cdot t - \varnothing) \}$$

收稿日期:2009-08-20

作者简介:袁美俊(1983-),男,山西翼城人,硕士,助教,研究方向为路面工程。

其中： $R_d=1/\{(1-(w'/w\cdot v)^2)^2+(2\xi\cdot(w'/w\cdot v)^2)^2\}$,

$\xi=c/2M\cdot w', w=(k/M)^{0.5}.$

$M、m$ —模拟车辆的各部位质量

k —车架体系的刚度/ $N\cdot m^{-1}$

c —车架体系的阻尼/ $N\cdot s\cdot m^{-1}$

$Y(t)$ —车架体系在垂直方向上位移

$y(t)$ —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

ϕ —相位角

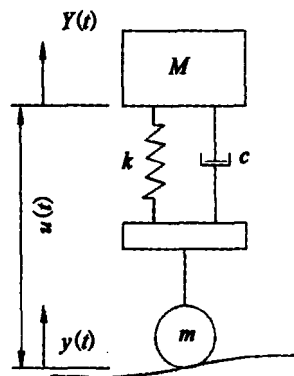


图 1 单自由度 1/4 车辆振动模型

3 最大动荷载系数的确定

计算最大动荷载后,动荷系数 $D = F_{dmax}/(M + m) \cdot g_0$ 。

参考文献^[2],汽车技术参数选用如下:路面设计选用标准轴载是 100 kN,所以在 1/4 模型中只需要考虑的总重量为 5 000 kg, $M = 4\,800\text{ kg}$, $m = 200\text{ kg}$, $k = 4 \times 10^5\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $c = 14\,000\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。计算中考虑的行车速度为 $10 \sim 60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 6 个级别速度,确定出不同行车速度与激励波长的关系曲线如图 2 所示。最大动荷系数在不同的速度下都集中出现在 $1.4 \sim 1.6$ 之间,在文献^[2]中计算得到的最大动荷系数为 1.29。按计算得到的动荷系数,路面结构所承受的移动荷载最大为静荷载的 2.6 倍,但是该荷载具体对路面产生如何的影响不能仅通过比较其与静荷载值的大小来得出,还应该考虑到动荷载在路面上的作用时间。在图 2 中波长一定时,不同行车速度所产生的动荷系数在有些区域变动比较大,比如波长在 $5 \sim 15\text{ m}$ 的动荷系数变化很大。当波长超过 20 m ,各种行车速度对路面所能造成的动荷载都比较小。

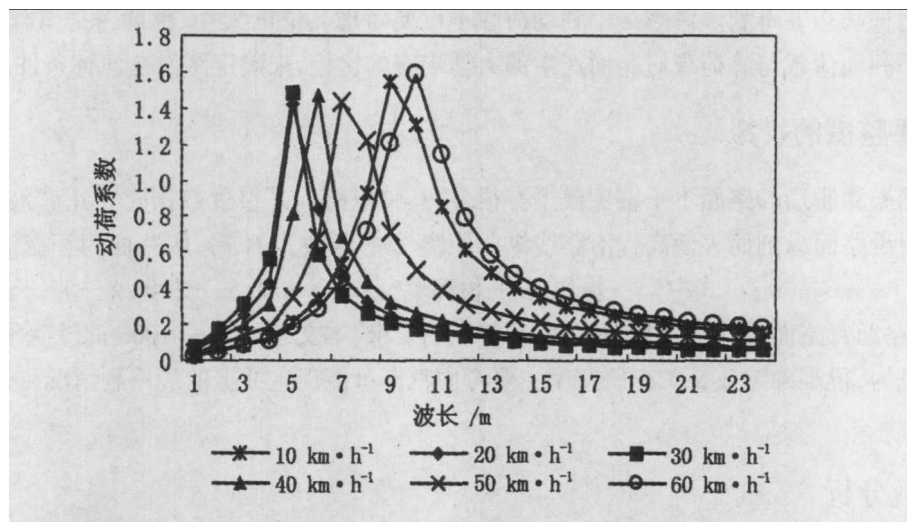


图 2 不同车速下动荷系数与路面状况的关系

从图 2 中也可以看出,无论汽车以何种速度行驶,随着路面波长的变动,动荷系数都先后出现峰值。出现峰值的原因是由于车辆系统的振动频率与路面传给汽车的激励频率接近形成共振,而激励波的频率是由路面不平度波长和车速共同决定的,由此不同车速在不同波长位置产生的动荷系数峰值都比较接近。车辆振动对路面产生的最大动荷载可以在不同的行车速度下实现,但是路面结构在不同行车速度下的力学响应必然存在区别。

4 路面在不同荷载下力学响应

4.1 计算模型、参数及加载方式

以车辆对路面的静态荷载和不同行驶速度下的最不利动态荷载对半刚性基层沥青路面动力响应分

析。由于平整度因素对路面的动力响应影响很大且不确定,在研究分析中只考虑不平整度给路面做能造成的最不利荷载。并且与静态荷载以及不考虑平整度因素的动态荷载进行路面力学响应的对照分析。重点研究车速变量对半刚性基层沥青路面动力响应的影响。三维有限元计算模型^[4,5]将车辆荷载经过路面某一区域的过程视做匀速运动,采用对该区域施加一定时间内的瞬态荷载来模拟。研究对象由沥青面层、半刚性基层、底基层、路基组成。

有限元分析基本假设为:各结构层为均匀、连续、各向同性的弹性体;土基层全约束,路面结构四周自由;各个结构层之间为完全连续状态。沥青混凝土面层拟定为 10 m×5 m,厚度 12 cm;半刚性基层平面尺寸与面层相同,厚度为 25 cm;底基层厚度为 30 cm;路基平面尺寸拟定为 14 m×7 m,厚度取 6 m,平面布置图如图 3 所示。

对于车辆轮胎压力取值为 0.7 MPa。计算时所取的车速分别为 10,20,30,40,50,60 km·h⁻¹,则在轮压范围内荷载峰值到达的时刻分别为 0.072,0.036,0.024,0.018,0.014 4,0.012 s。速度与加载时间关系与文献^[6]中采用的 49.3 km·h⁻¹和 0.014 6 s 考虑的轮胎接地长度为 20 cm 左右进行计算, $t=0.2/v$ 。进行动力分析时采用完整的系统矩阵计算瞬态响应 full 求解法,瞬态动荷载加载方式如图 2 所示。计算荷载峰值时刻的面层底部的纵向拉应变、横向拉应变以及面层内部在荷载下的最大压应变,计算点位于双轮中心。进行动力响应分析时各结构层采用的主要计算参数见表 1。表中阻尼系数取值参考文献^[7]。

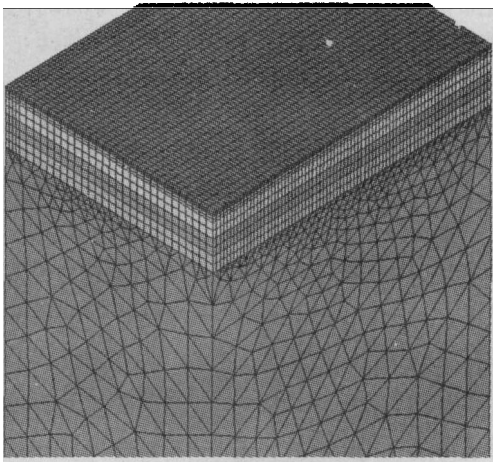


图3 路面结构的有限元模型

表1 有限元计算模型各参数取值

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比 μ	密度/kg·m ⁻³	阻尼系数
沥青混凝土面层	0.12	1 250	0.25	2 400	0.03
半刚性基层	0.25	1 350	0.25	2 300	0.02
底基层	0.30	250	0.30	2 000	0.03
路基	6.00	45	0.35	1 800	0.04

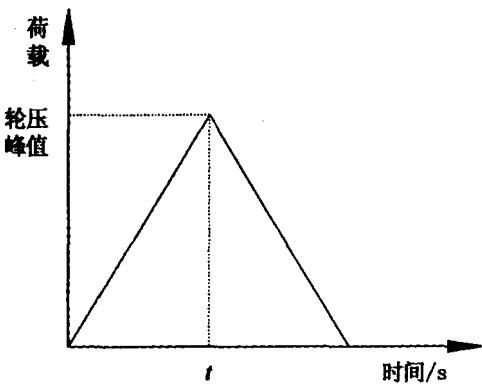


图4 计算模型中荷载施加时间关系

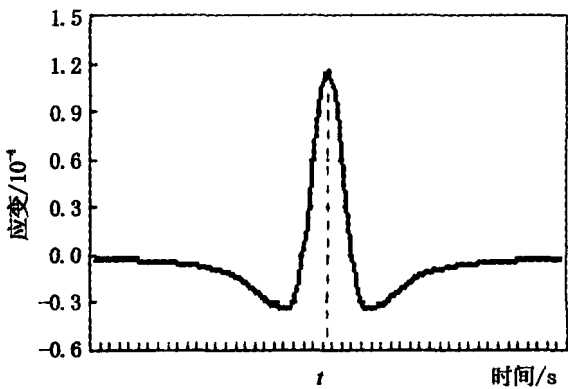


图5 路面内部一点的应变变化曲线

从图 5 中可以看出, t 时刻对应的路面内部的应变是最大的。由于沥青路面的面层层底拉应变与其内部的压应变分别体现了路面的抗疲劳性能和抗车辙性能,本文重点研究图 4 中 t 时刻所对应的路面结构内最大拉应变及压应变, t 随行车速度发生变化。

4.2 不同状态下面层底面拉应变与车速关系

图6与图7中是路面结构在静态荷载、动态荷载及最不利动荷载三种情况下的面层底拉应变变化规律,其中图6是面层底纵向拉应变,图7是横向拉应变变化规律。在不考虑路面平整度因素时,车辆对路面荷载作用只包含轴重,在图6与图7中可以看出,如果路面平整度状况很好,车辆不对路面产生冲击,移动荷载对路面造成的面层底拉应变比静态荷载作用下产生的拉应变小,特别是随着行车速度的提高降低。如果考虑不平整度给车辆造成的影响,根据上文的计算结果路面不仅要承受车辆的轴重,还要承受车辆系统振动给路面产生的动荷载。附加产生的动荷载最大为轴重的1.6倍,路面结构所要承受的最不利荷载为轴重的2.6倍,有学者认为这么大荷载对路面的损害是致命的。但从图6与图7可以看出最不利状态下路面面层底的拉应变在车速较低时的确比较大,但是当车速超过 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,最不利动荷载对路面结构产生的拉应变已经比静态荷载作用产生的拉应变小了。按高速公路设计速度来看应该都能满足 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的要求,再加上路面的平整度状况较好,动态荷载对路面的损伤比静态荷载所产生的应力应变大的可能性很小。

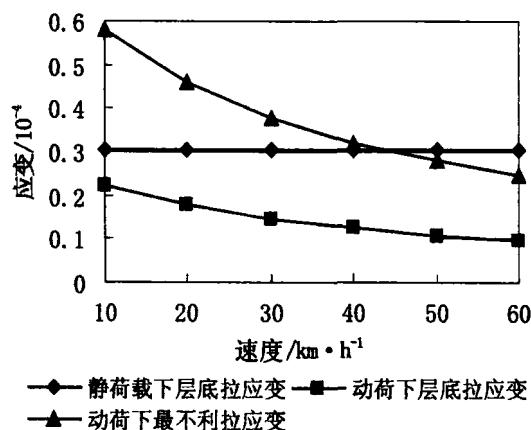


图6 面层底纵向拉应变在不同荷载下变化规律

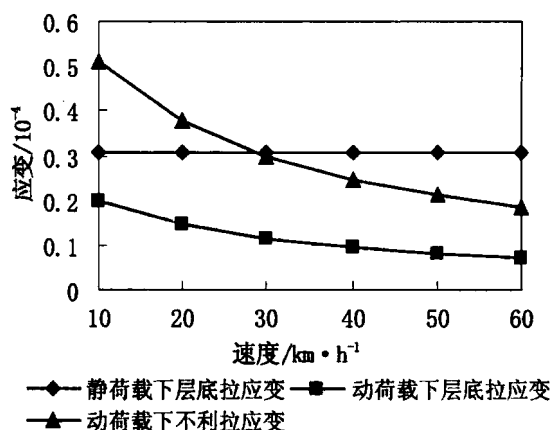


图7 面层底横向拉应变在不同荷载下变化规律

国外路面设计方法多采用面层底面拉应变作为疲劳寿命的控制指标,主要是以AI设计法为代表^[8]。依据美国沥青协会AI方法的疲劳破坏标准进行分析,采用静态荷载作用下面层底面拉应变为路面结构的最不利状态,设计出的路面结构是安全的。

通过对图6与图7的数据分析,发现车速在 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上时,最不利动荷载产生的面层底面拉应变要比静态荷载作用下的拉应变减小10%以上。在保证路面平整度的前提下,路面结构中出现的拉应变始终小于静态荷载作用下产生的拉应变,并且降低幅度很大,最少都可以降低30%以上。

4.3 面层内压应变与行车速度关系

图8是面层结构内部最大压应变与行车速度的关系,考虑了静态荷载、动荷载以及最不利动荷载。从图中可以发现,路面结构产生的压应变随行车速度的变化很敏感。当行车速度超过 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,在最差路况下面层内最大压应变都基本和静态荷载下的最大压应变值相当。从面层内部压应变变化规律来看,即便考虑到动荷载的最不利状况,行车速度只要超过 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 路面结构按静态荷载进行设计就是安全的。另外从压应变与速度的变化规律来看,行车速度的提高能有效的降低路面结构内部的压应变,从而能延长沥青面层永久变形的疲劳寿命。

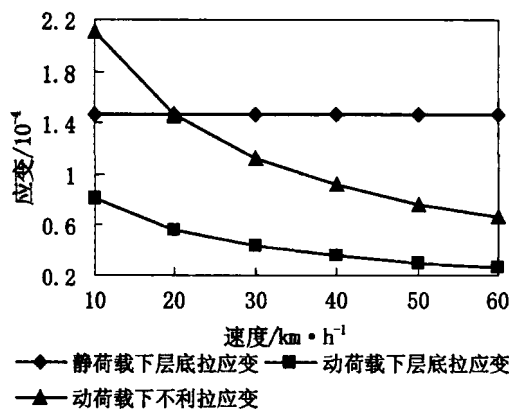


图8 面层内最大压应变变化规律

5 结论

(1) 路面结构在动态荷载的作用下,面层内最大压应变、面层层底拉应变和静态荷载作用下的值的大小关系同速度有很大关联。当车辆速度高于 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,能确保按照静态荷载设计的路面结构可以承受最不利动态荷载。

(2) 通过对路面结构进行动荷载分析,发现只有在低速行车并且路面平整度差的前提下,路面结构内产生的各种应变才有可能比静态荷载下的应变值大。

(3) 面层内部最大压应变与结构压密变形应该存在一定的联系,速度由 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高到 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,最大压应变降低 30%,可以使在相同车辙深度下的累积轴载作用次数大幅度提高,高速公路应该严格设定各类重车的最低行驶速度。

参考文献:

- [1] Mostafa Y D. Response of concrete pavements under moving truck loads[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133 (12): 670 - 676.
- [2] 于 清. 不平整路面上的汽车动荷载[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(4): 36 - 38.
- [3] 刘晶波,等. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [4] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.
- [5] Mariana R. Effect of bond condition on flexible pavement performance[J]. Journal of Transportation Engineering, November. 2005, 131 (11): 880 - 888.
- [6] Bassam S. Three-dimensional dynamic analysis of flexible conventional pavement foundation[J]. Journal of Transport Engineering, June. 2005, 131(6): 460 - 469.
- [7] 杨 斌. 移动荷载作用下沥青加铺层结构动力响应分析[J]. 广西工学院学报, 2006, 17 (2): 9 - 12.
- [8] 沈金安. 国外沥青路面设计方法汇总[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.

Dynamic Analysis of Asphalt Pavement Response Under Moving Loading

YUAN Mei-jun¹, JI Xiao-ping², XING Qin-yu³, ZHANG Bo²

(1. Jiangsu Transportation Technician College, Zhenjiang 212006, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Road and Bridge East China Engineering Co., Ltd. Shanghai 200135, China)

Abstract: To analyze the response of pavement structure under moving loading, a quarter vehicle model with single free-degree and unevenness model are established. The dynamic loads are calculated through combining different pavement conditions and speed. When the incentive frequency which is passed to vehicles by the road is close to its own vibration frequency, vehicles will produce the greatest dynamic load. Three-dimensional finite element method is used to calculate the stress and strain of different layer with various speeds under static or dynamic loads. The results conclude that design of pavement structure by static load is safe.

Key words: moving loading; asphalt pavement; three-dimensional finite element; speed of vehicle

(责任编辑:王全金)