

非均布移动荷载下路面结构应力分析

王 鹏, 郭成超

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:采用移动加载的动载模型,考虑非均布轮胎荷载模式以真实地模拟行车方式,建立三维有限元路面结构模型,分析了非均布移动荷载作用下路面结构的应力响应,以及不同行车速度对结构的影响,以探求移动荷载作用下表面裂缝的开裂机理。结果表明:移动荷载作用下结构内拉应力不至于引起表面裂缝的产生,但在轮迹带内边缘下最大剪应力比较大,对高速道路应注意高速下拉应力的影响;在低速的路面上更易出现表面纵向裂缝,对低速路面抗剪强度的控制尤为重要。

关键词:移动荷载;表面裂缝;应力分析;路面结构

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

0 引言

道路路面结构在其服务期内经受行车荷载的反复作用,通过理论或数值方法对路面结构变形或应力状态求解时,施荷模式通常采用静载或动载模型^[1-2]。传统对静载模型已经展开了大量的研究,且比较成熟,包括我国柔性路面设计就是采用双圆静载模型。而对于动载研究相对来说比较少,且多数动载模型都是将移动行车荷载简化为对某一位置的垂直加载形式,即垂直脉冲加载的动载模型,笔者采用移动加载的动载模型,并考虑轮胎胎面花纹的形式,改变传统均布荷载模式采用非均布条带状荷载形式,真实地模拟行车的作用,分析了移动荷载作用下路面结构的响应,探求移动荷载作用下表面裂缝的开裂机理^[3]。

1 移动荷载模型

计算过程中为实现荷载的移动,首先沿荷载移动方向设荷载移动带,移动带沿路横向的宽度与施加的荷载宽度相同,移动带沿路纵向的长度为轮载行驶的距离。将荷载移动带细分成许多小矩形,如图1所示,小矩形宽度依计算精度而定,取轮载长度的1/3。

图1中,开始运动时荷载占了3个小矩形的面积,即图中1,2和3。移动过程中,荷载沿移动

带逐渐向前移动,通过设置多个时间步来实现。每个时间步结束时,荷载整体向前移动一个小矩形面积,如第一个时间步结束时,荷载占据面积为2,3和4。时间步的大小通过荷载的移动速度及移动带上划分的小矩形宽度来确定。

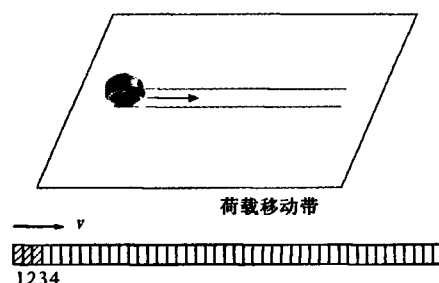


图1 移动带细分图

Fig.1 Subdivision of Load Moving Strip

移动加载通过 ABAQUS 自编子程序来实现^[4],随着时间的变化,荷载沿预定义的路径向前移动,在子程序中通过步长时间与速度的乘积来实现荷载位置定位^[5]。

2 非均布移动荷载模型

2.1 车轮与路面接触轮迹的简化

传统将轮胎与路面的实际接触形状等效为两个矩形并在其上作用均布荷载。笔者考虑实际轮胎花纹的形式;将其等效为条带状,建立非均布荷载作用模式^[6-8],如图2所示。

收稿日期:2011-04-15;修订日期:2011-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(150978234)

作者简介:王鹏(1973-),女,河南洛阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事路基路面结构的分析与检测,E-mail: wangp@zzu.edu.cn.

2.2 车辆荷载的模拟

为了模拟路面结构中车辆荷载产生的动力效应,采用 ABAQUS 的 DLOAD 用户子程序来反映荷载随时间与空间坐标的变化.通过 DLOAD 子程序中步长时间与设计时速 v 的乘积来反映车辆移动情况,实现移动荷载的作用^[9](如图 3 所示).

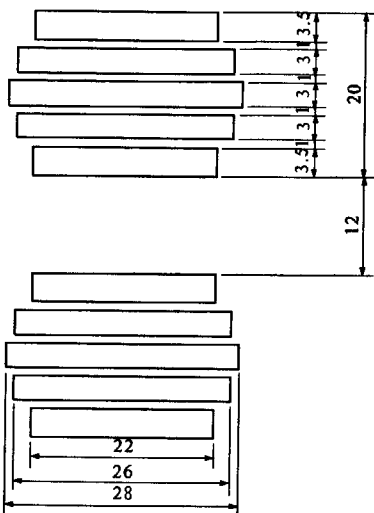


图 2 双轮等效接触面积的简化图 (cm)

Fig. 2 Contact area of equivalent load

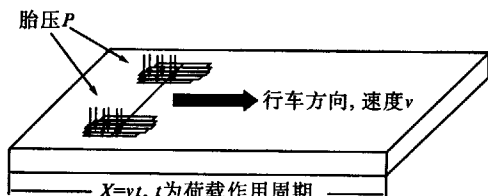


图 3 行车荷载的模拟

Fig. 3 Simulation of non-uniform tire pressure with moving load

3 非均布移动荷载作用下路面结构应力的响应

考虑轮胎胎面花纹的存在,带状荷载更接近于轮胎与地面的作用方式.取纵向花纹带状荷载形式来模拟分析移动荷载作用下路面结构的响应.为详细分析移动轮胎作用下路面结构的响应,分别对应轮迹线下纵向中心线、轮内侧边缘、轮中和轮外侧边缘选取 4 个点,这 4 个点分布如图 4 中 $a \sim d$ 点.考虑移动荷载作用下对应各点的响应.

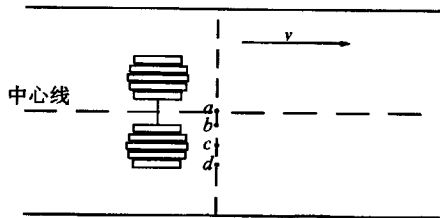


图 4 计算点示意图

Fig. 4 Schematic drawing of position for calculation

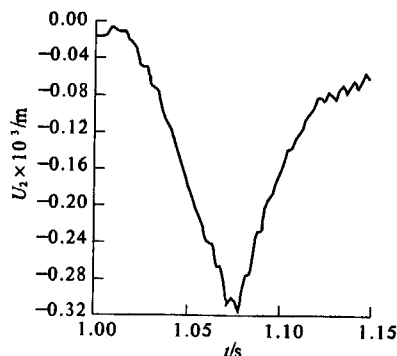


图 5 移动荷载作用下弯沉的变化

Fig. 5 Changes of deflection under moving load

移动荷载作用下,路面各层应力都经历了从小到大,然后再从大到小的过程,这是由于荷载在移动过程中,中心线下的结构层内各点在荷载作用都经历从远离—渐近—正上方—渐远—远离的过程,对应 a 点下弯沉变化如图 5 所示, a 点处各结构层底拉应力的变化如图 6 所示.

由图 5 可以看出,移动荷载作用下弯沉 U_2 随荷载移动的位置而变化,即在一定的行车速度下和车辆运行时间有关.随着荷载的移动,荷载作用比较远时弯沉为零,当荷载接近作用点时,弯沉增大,然后在荷载到达作用点正上方时为最大,再随着荷载作用远离逐渐变化到零.

各结构层底应力和弯沉变化规律比较相似,但面层底拉应力显示为负值,在车辆荷载经过作用点上方时为最大;基层和底基层底拉应力为正值,也在车辆荷载经过作用点上方时为最大;土基层顶压应力则反复变化,拉压交错.

a, b, c, d 4 点的弯沉、拉力和最大剪应力比较分别见图 7(a) ~ (d).从图中可以看出,移动荷载作用下, a 点弯沉变化和面层任意点弯沉变化一样,都是在荷载作用接近时才有变化,荷载作用到正上方时弯沉最大. b, c, d 其他 3 点弯沉变化情况和 a 点一样,在荷载作用下的双轮中心线位置弯沉最大,依次为轮胎内边缘、轮中和轮外侧,而且各点弯沉相差不大.

a 点各个方向上的拉应力变化和各层底拉应力变化一样,都是在荷载作用接近时快速增长,荷载作用在正上方时应力达到最大,在荷载远离后,又迅速消减为 0. b, c, d 其他 3 点拉应力变化情况和 a 点一样,在移动荷载作用下的车中心线位置拉应力最大,依次为内边缘、轮中和轮外侧.

路面结构模型取行车方向为 1 方向,结构深度方向为 2 方向,垂直行车方向的截面为 3 方向.经计算 a 点 S_{23} 、 S_{13} 剪应力几乎没有变化, S_{12} 变化

比较大,而且在荷载作用的正上方时应力最大, a 点最大剪应力有较大变化,同样荷载作用到正上方时应力最大. b, c, d 其他3点最大剪应力变化情况和 a 点一样.

移动荷载作用下,其拉应力均为负值,表现为受压状态,不至于引起表面裂缝的产生,相对来讲,其最大剪应力比较大,最大剪应力的位置出现在轮迹带内边缘下.

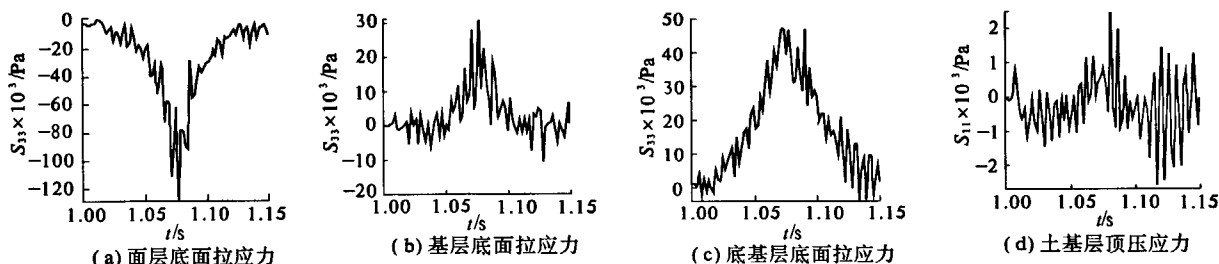


图6 移动荷载作用下应力的变化

Fig. 6 Changes of stress under moving load

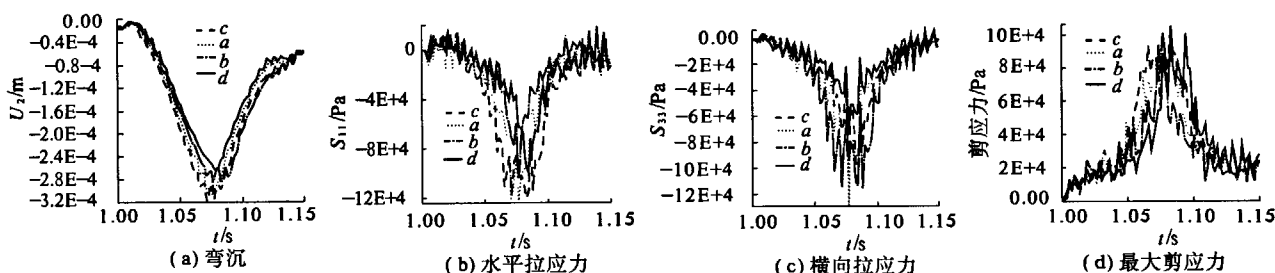


图7 移动荷载作用4点弯沉及应力变化

Fig. 7 Changes of deflection and stress at different locations under moving load

4 不同行驶速度下路面结构应力的响应

考虑行车速度分别为60, 90, 120 km/h时,分析不同移动荷载速度对应力的影响.3个速度下路面结构在移动荷载作用下的最大弯沉见图8(a).横向应力 S_{33} 如果比较大,可能会引起路面沿行车方向的纵向裂缝,因此比较3个速度下车辆荷载运行到不同位置时的 S_{33} ,如图8(b)所示.另外对可能引起纵向裂缝的13方向的剪应力及最大剪应力也进行分析,比较在3个速度下车辆荷载运行到不同位置的 S_{13} 如图8(c)所示;比较最大剪应力如图8(d)所示.

图8显示,移动荷载作用下路面结构弯沉小

于静态时的弯沉.这一点与采用脉冲动荷载形式的FWD检测的结果是一致的.在移动荷载作用下,各个位置路面内部的最大应力响应并不是恒定的值,而是不断扰动的.移动荷载下的各种应力均围绕在静载下的应力值上下扰动.移动荷载下最大拉应力 S_{33} 其扰动的平衡位置略大于静载计算结果.且随着速度的增长而增大,但其值整体上小于最大剪应力值.移动荷载下 S_{13} 和最大剪应力值扰动的平衡位置略小于静载计算结果,且随着速度的增长而减小.因为最大剪应力值整体上较大,接近沥青混合料的抗剪强度,因此在低速的路面上更易出现表面纵向裂缝.

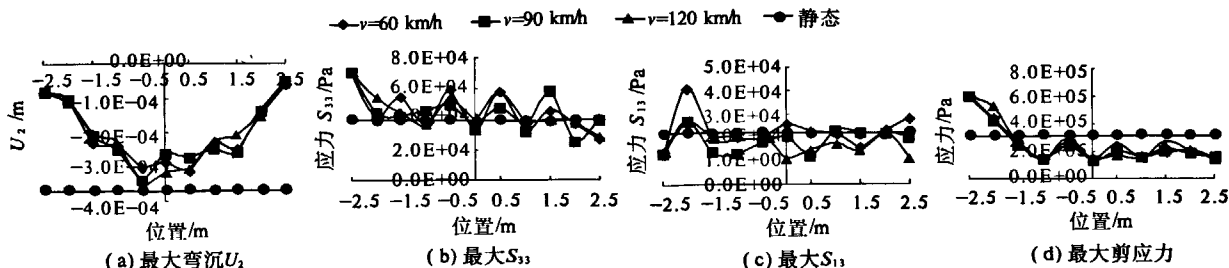


图8 不同行车速度最大弯沉与应力比较

Fig. 8 Comparison of maximum deflection and stress with different speed

5 结论

(1)移动荷载作用下,其结构中心线下各点拉应力均为负值,表现为受压状态,不至于引起表面裂缝的产生,与此相比其最大剪应力比较大,最大剪应力的位置出现在轮迹带内边缘下。

(2)移动荷载作用下路面结构弯沉小于静态时的弯沉。在移动荷载作用下,各个位置路面内部的最大应力响应并不是恒定的值,而是不断扰动的。移动荷载下的各种应力均围绕在静载下的应力值上下扰动。移动荷载下横向最大拉应力扰动的平衡位置随着速度的增长而增大,因此对高速道路应注意高速下拉应力的影响。移动荷载下剪应力值扰动的平衡位置随着速度的增长而减小,但最大剪应力值整体上较大,接近沥青混合料的抗剪强度,因此在低速的路面上更易出现表面纵向裂缝,对低速路面抗剪强度的控制尤为重要。

参考文献:

[1] 朱照宏,王秉纲,郭大智.路面力学计算[M].北京:

人民交通出版社,1985.

- [2] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].上海:同济大学出版社,2003:109-122.
- [3] 张起森,郑健龙,刘益河.半刚性基层沥青路面的开裂机理[J].土木工程学报,1992,25(2):13-22.
- [4] 庄茁,张帆,岑松,等.ABAQUS非线性有限元分析与实例[M].北京:科学出版社,2005:17-105.
- [5] 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.
- [6] 王阳,刘兆金.我国日前的车辆荷载特性及其对路面结构的影响[J].辽宁建材,2004,3(3):69-70.
- [7] 谢水友,郑传超.轮胎接触压力对沥青路面结构的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):12-16.
- [8] 胡小弟,孙立军.沥青路面结构在非均布荷载作用下的三维有限元分析[J].长安大学学报:自然科学版,2003,23(3):15-20.

Stress Analysis of Pavement Structure in Non-Uniform Tire Pressure and Moving Load

WANG Peng, GUO Cheng-chao

(School of Water Conservancy and Environmentl Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The moving load in consideration of the non-uniform tire pressure to simulate the real traveling situation is adopted. A 3D finite element model of semi-rigid pavement structure is established to analyse the stress response of structure and the influence of different velocity in order to search for the mechanism of surface-initiated cracking. The conclusion can be drawn that the stress can not lead to produce the top-down crack under the moving load. Relatively the maximum shearing stress is larger than stress and appears under the inside edge of tire. More attention should be paid to the influence of stress in high velocity in expressway. It is easier to produce the longitudinal surface-initiated cracking in the low velocity pavement. Therefore it is important to control the shear strength of pavement structure of highway in low velocity.

Key words: moving loading; surface-initiated cracking; stress analysis; pavement structure