

动态荷载作用下不同下封层沥青路面力学响应分析

张敏江¹, 于江¹, 郭超², 李姝¹

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 分析在两种不同行驶位置的移动荷载作用下, 不同下封层沥青路面力学性能的差异. 方法 笔者对4种不同下封层的沥青路面进行室内模拟试验, 获得不同下封层下基层间的连接状况参数. 在此基础上建立移动荷载作用下不同基层连接状况的沥青路面结构有限元分析模型. 结果 基层连接状态越好, 移动荷载作用下所产生的应力越小; 荷载位于路面中间所产生的竖向剪应力和基层层底拉应力比荷载位于路面两侧时大; 在不同基层间接触状态下, 荷载位于路面两侧的竖向剪应力的差异性大于荷载位于路面中间, 荷载位于路面两侧的基层层底拉应力的差异性稍小于荷载位于路面中间. 结论 与在路中央行车相比, 在路两侧行车对路面的不利影响更小. 下封层的连接效果越强, 荷载对路面结构的不良影响越小, 故推荐使用橡胶沥青封层.

关键词 下封层; 力学响应; 沥青路面; 移动荷载

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Mechanical Response Analysis of Asphalt Pavement with Different Lower Seal Coat under Dynamic Load

ZHANG Minjiang¹, YU Jiang¹, GUO Chao², LI Shu¹

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to analyze the difference of mechanical properties of asphalt pavement with different lower seals under moving loads at two different driving positions. The author carries out laboratory tests on four kinds of asphalt pavement with different underlying seals, and the parameters of connection condition between four kinds of underlying seals are obtained. On this basis, the finite element analysis model of asphalt pavement with different base course connections under moving loads is established. The results show that: the better the connection state of the base

收稿日期: 2019-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478276)

作者简介: 张敏江(1960—), 男, 教授, 博士, 主要从事路面结构等方面研究.

course, the smaller the stress produced under moving load; The vertical shear stress and the bottom tensile stress of the base course caused by the load in the middle of the pavement are larger than those caused by the load on both sides of the pavement; Under different contact conditions, the difference of vertical shear stress when the load is on both sides of the pavement is greater than that when the load is in the middle of the pavement, and the difference of bottom tensile stress when the load is on both sides of the pavement is slightly less than that when the load is in the middle of the pavement. The stronger the connection effect of the lower seal layer, the less the adverse effect of the load on the pavement structure. Driving on both sides of the road has less adverse effect on the road surface. Rubber asphalt seal is recommended.

Key words: lower seal coat; mechanical response; asphalt pavement; dynamic load

下封层是指设置在沥青路面基层间,用来加强层间连接、防止水损害和延缓反射裂缝扩展的沥青混合料薄层。目前,无机结合料稳定类基层沥青路面因其强度高、抗永久变形能力强等优点,在我国高等级公路沥青路面中广泛应用^[1]。无机结合料稳定类基层和沥青混合料面层间材料的差异,会使基层层间连接状况较差,由此导致路面推移和疲劳开裂等病害,严重影响沥青路面的路用性能和使用寿命^[2]。

近年来,对于不同基层层连接状况下的无机结合料基层沥青路面力学行为,国内外专家学者做出了大量的研究工作。赵艳玲^[3]分析了层间完全连续和不完全连续时路表弯沉、结构层各向水平拉应力、剪应力等响应效果,结果表明层间接触不良易诱发路面结构的竖向变形、裂缝、车辙等病害。罗要飞等^[4-5]使用 BISAR3.0 软件计算并研究了不同基层层间连接状态下的力学响应和疲劳寿命的变化规律,研究表明如果基层层间完全光滑,则会对拉应力、拉应变、剪应力产生显著的影响,但是弯沉几乎不受层间接触状态的影响。龚红仁^[6]研究了在有无水平力时层间状态对疲劳寿命的影响及力学响应,结果发现层间非完全连续路面的疲劳寿命仅为完全连续路面的疲劳寿命的 1%。并且无论有无水平力,层间接触状态对磨损层层底的弯拉应变变化规律有很大影响,水平力会增加路面结构层内弯拉应力的分布深度。

已有研究多是针对不同下封层路面结构在静荷载作用下所发生的力学响应,或者仅仅分析单轮组移动荷载在道路中心的作用效果,而真实情况下的路面所受到的大部分是移动荷载,并且是双轮组协同作用在道路的两侧。此外,当车辆行驶过道路的某个横断面时,路面结构各层产生的力学响应是随时间变化的,不应只考虑静态荷载。基于此,笔者对辽宁省常用的四种下封层沥青路面进行室内模拟剪切试验研究,分析双轮组单轴轴载作用在几种不同下封层路面上两种不同位置时,路面结构所产生的竖向剪应力和基层层底拉应力。研究结果表明下封层连接状态越好,路面力学性能越优,荷载位于路面中间所产生的竖向剪应力和基层层底拉应力比荷载位于路面两侧时大。

1 建立有限元模型

1.1 路面结构和材料参数

根据文献[7]及辽宁省沥青路面常用结构类型,确定路面结构层组成类型、各结构层厚度及材料属性参数,结果见表 1。

1.2 下封层连接状况参数

对带不同下封层的路面结构模型剪切试验,笔者采用 μ 表示摩擦系数,则 $\mu \cdot I_p = \tau_f$, 其中 I_p 为基层层接触面之间的接触压应力, τ_f 为基层层间抵抗剪应力的极限值。当 $\tau < \tau_f$ 时,接触面不会产生相对位移;当 $\tau > \tau_f$ 时,接触面就会产生相对位移,其中 τ 为层间

表1 沥青路面结构材料参数

Table 1 Material parameters of asphalt pavement structure

结构层	厚度/cm	动态模量/MPa	泊松比
表面层	4	8 000	0.3
下面层	6	10 000	0.3
基层	20	17 000	0.25
底基层	20	17 000	0.25
土基	—	60	0.4

剪应力. 摩擦系数根据直接剪切试验所得. 试验装置为直接剪切仪(见图1).

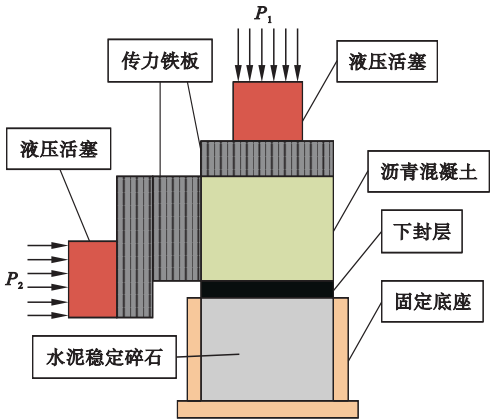


图1 直接剪切试验加载模型

Fig.1 Direct shear test loading model

利用直接剪切仪对试件施加竖直压力和

水平压力. 将竖向荷载设为固定值 I_{σ} ,随后逐渐增大水平荷载. 当施加的荷载形成的水平剪应力达到试件最大抗剪强度时,试件上、下两部分会沿着下封层所在的水平面发生相对滑移,记录此时的水平压力值,根据式(1)和式(2)计算出作用在剪切面上的接触压应力 I_p 和抗剪强度 τ_f ^[8-9]:

$$I_p = \frac{I_{\sigma} \cdot S_v + G}{S_j} \tag{1}$$

式中: I_p 为正应力,MPa; I_{σ} 为垂向压力值,MPa; S_v 为垂向油缸活塞面积, m^2 ; G 为滚珠轴承、传压铁块及上层沥青块的总重,MN; S_j 为剪切面面积, m^2 .

$$\tau_f = \frac{I_r \cdot S_h}{S_j} \tag{2}$$

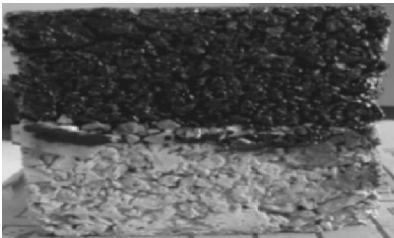
式中: τ_f 为抗剪强度,MPa; I_r 为试件发生滑移时的平压力值,MPa; S_h 为水平油缸活塞面积, m^2 .

改变垂直荷载大小,得到不同正应力下对应的抗剪强度,利用最小二乘法计算得到下封层材料的摩擦系数 μ , μ 越大则下封层技术的层间连接效果越好.

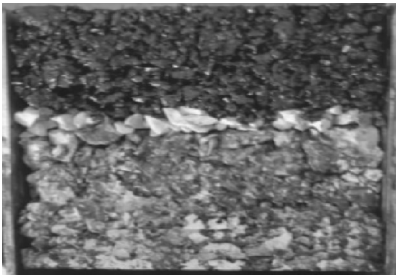
笔者制作的试验试件见图2. 根据式(1)、式(2)计算得到连接层摩擦系数结果见表2.



(a) 热沥青碎石封层



(b) 橡胶沥青碎石封层



(c) 乳化沥青碎石封层



(d) 稀浆封层

图2 不同下封层材料试件

Fig.2 Test pieces of different lower sealing materials

表 2 不同下封层材料摩擦系数

Table 2 Friction coefficients of lower seal coat materials

下封层类型	摩擦系数
橡胶沥青封层	0.571
乳化沥青碎石封层	0.527
稀浆封层	0.516
热沥青碎石封层	0.491

1.3 移动荷载的实现与施加

基于有限元软件 ABAQUS 分别进行 DLOAD 以及 UTRACLOAD 子程序的二次开发,其中编写 DLOAD 子程序以实现移动竖向荷载的施加,而 UTRACLOAD 子程序的编写则是为了实现移动荷载的水平荷载的施加^[10-12].轮组示意图及动态荷载示意图如图 3、图 4 所示.其中竖向荷载为 700 000 Pa,切向荷载为 105 000 Pa(为竖向荷载的 15%),方向与行车方向相反^[13-14].

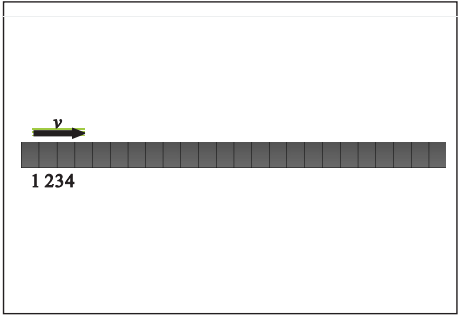


图 4 荷载移动带

Fig. 4 Moving band of load

为了实现移动荷载,须在有限元模型上设置与单个车轮荷载作用宽度相同的移动带,将其分为一定宽度的小矩形.图 4 所示,当处于初始状态时,车轮位于 1、2、3 号矩形之上,当第一个时间步结束时车轮荷载位于第 2、3、4 号矩形之上^[15-16].通过设置多个类似的时间步便可以模拟移动荷载的作用效果.沥青混凝土铺装层的剪切滑动在低速行车荷载下更容易发生,设定汽车以 84 km/h 的速度行驶,那么在 0.1 s 内能够行使 2.33 m,笔者所建立的模型中小矩形宽度为 0.167 m,所以在 0.1 s 内行驶过的网格数量为 $2.33/0.167=14$ 个.为了对比车辆在路面上不同位置行驶所产生的力学响应差异,选取两种不同的行驶轨迹,如图 5 所示.

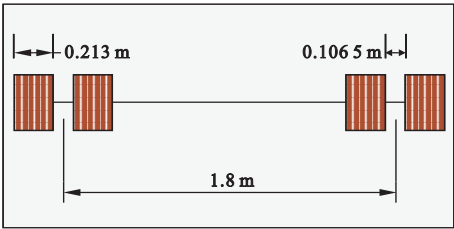
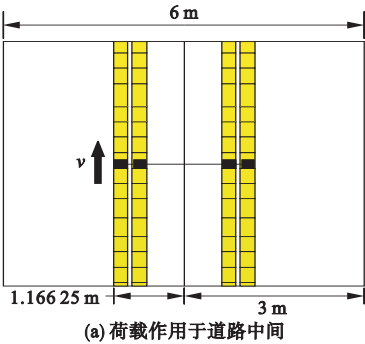
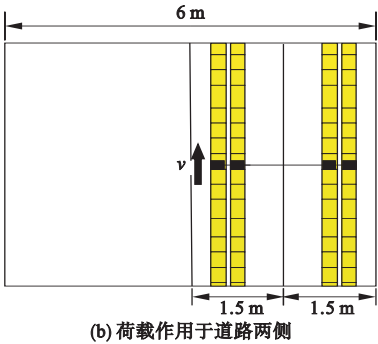


图 3 双轮-单轴示意图

Fig. 3 The diagram of two wheels-one axle



(a) 荷载作用于道路中间



(b) 荷载作用于道路两侧

图 5 动态荷载轨迹

Fig. 5 Diagram of dynamic load path

2 移动荷载作用下力学响应分析

2.1 竖向剪切应力

失稳型车辙形成的主要原因为车轮荷载

作用所产生的竖向剪切应力大于沥青混凝土所能承受的剪应力,轮迹正下方的沥青混凝土受压产生横向流动变形,两侧的沥青混凝土被挤压形成隆起.已有研究表明基层层间

的连接状态会影响荷载作用所产生竖向剪切应力的^[16-17]。荷载行驶到模型轨道中间时的竖向剪应力应力云图如图6所示。分析

采用的三维模型截面位于垂直于荷载前进方向且荷载轨迹长度的1/2处(见图7)。

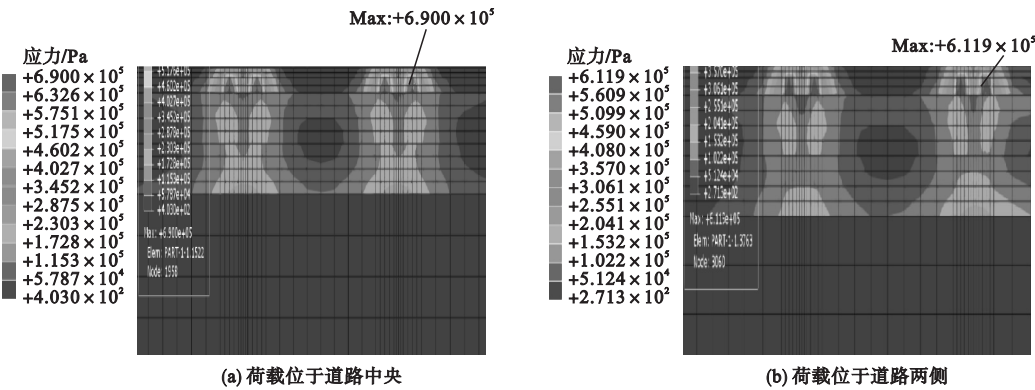


图6 竖向最大剪切应力云图

Fig. 6 Contour plots of maximum vertical shear stress

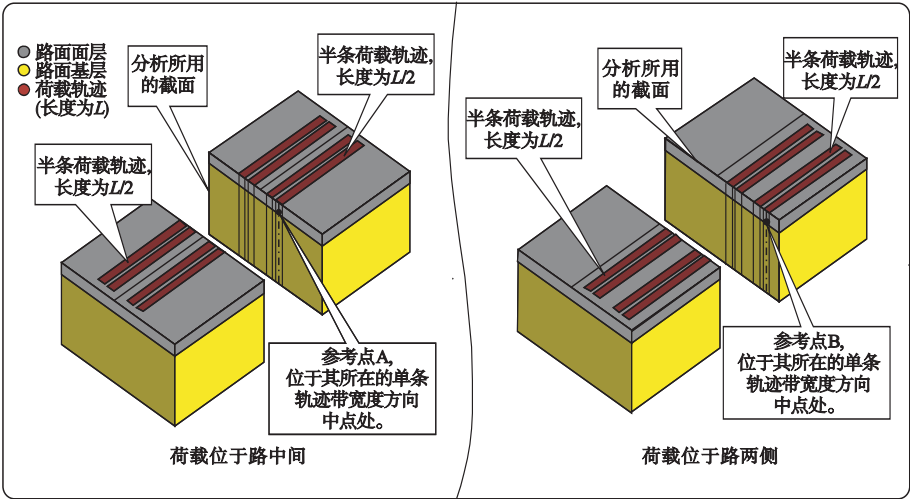


图7 三维数值模型示意图

Fig. 7 A schematic diagram of a three-dimensional numerical model

最大剪应力产生于单个轮胎荷载中心正下方基面层层间接触处,下面层处的剪应力较大,上面层处的剪应力较小,呈现出由面层底部向上逐渐减小的趋势。路面基层及土基产生的竖向剪应力相对较小。在基面层间接触状态完全一致的前提下,比较两个不同行车位置的竖向剪应力,发现在路中央施加移动荷载所形成的最大竖向剪应力为 6.900×10^5 Pa,而在道路两侧施加移动荷载所形成的最大竖向剪切应力为 6.119×10^5 Pa,道路中央施加移动荷载所产生的剪应力大于在道

路两侧施加移动荷载所产生的剪应力。如图7所示,在移动荷载作用于道路中央的模型与移动荷载作用于道路两侧的模型中选取参考点A、B,分别建立关于A、B两个参考点的竖向剪切应力时程曲线如图8所示。从图中可以看出,A、B两参考点上的竖向剪应力变化趋势基本一致,当趋近于参考点上方时快速增大,到达参考点上方时达到最大,后快速下降。参考点A处的竖向剪应力在整个过程基本都大于参考点B。A、B处两处剪应力最大值分别为 6.900×10^5 Pa、 6.119×10^5 Pa。

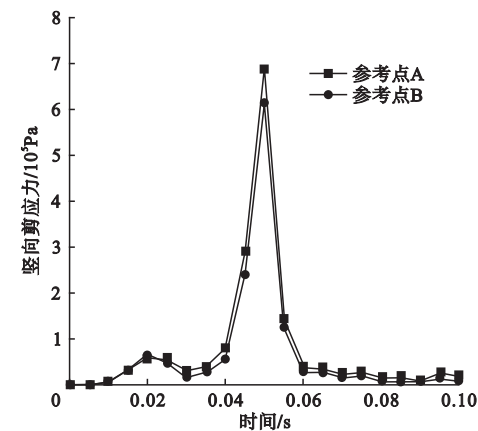


图 8 参考点 A、B 竖向剪切应力时程曲线

Fig. 8 Time history curves of vertical shear stress at reference points A and B

从 0.01 s 到 0.1 s,每隔 0.01 s 提取一次两模型中最大竖向剪应力,绘制两模型最大竖向剪应力时程曲线(见图 9).从图中可以看出,在相同时刻,基层层间连接状态越好,摩擦系数越大,路面结构所受到的竖向剪应力越小.

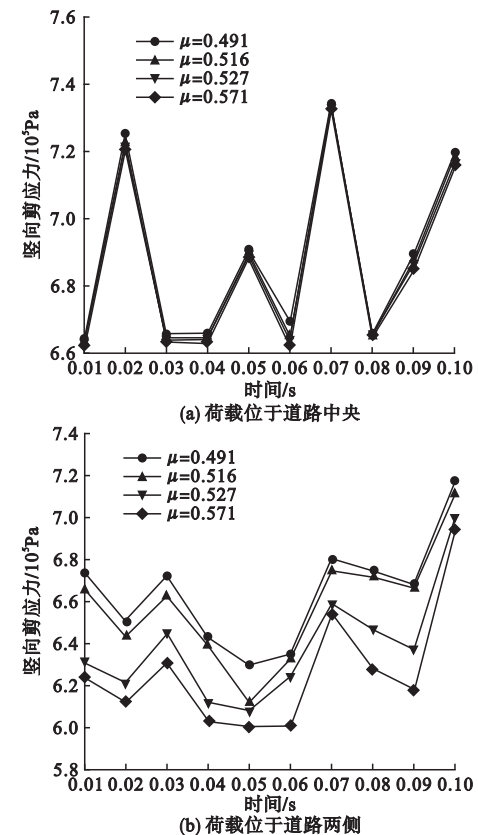


图 9 模型中各时刻最大竖向剪应力变化曲线

Fig. 9 Maximum vertical shear stress curves at each time in the model

计算得到每一种接触状态下最大竖向剪应力的平均值,结果见表 3.

表 3 各连接状态下竖向剪应力平均值

Table 3 Average value of maximum vertical shear stress under various connecting status 10^5 Pa

荷载位置	最大竖向剪应力平均值			
	$\mu=0.491$	$\mu=0.516$	$\mu=0.527$	$\mu=0.571$
路中央	6.892	6.877	6.867	6.857
路两侧	6.642	6.577	6.384	6.265

经过线性插值,得出两模型竖向剪应力平均值随摩擦系数变化函数如图 10 所示.从图中可以看出,两函数的斜率分别为 $|K_{\text{路中央}}|$ 与 $|K_{\text{路两侧}}|$,经比较发现 $|K_{\text{路中央}}|=4.893\ 8>|K_{\text{路两侧}}|=0.427\ 1$,可以得出不同基层层间接触状态下的基层层间的最大剪应力的差异性,在路面两侧位置时明显大于位于路面中间位置.当移动荷载作用在道路中央时产生的竖向剪应力的的大小受基层层间连接状态的影响更小,当移动荷载作用在道路两侧时产生的剪应力值受基层层间连接状态的影响更大.

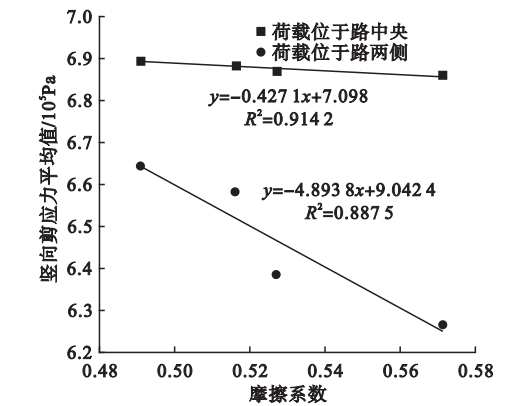


图 10 竖向剪应力平均值随摩擦系数变化曲线

Fig. 10 The curves of the mean value of vertical shear stress varying with friction coefficient

2.2 基层层底拉应力

当荷载行至移动轨迹一半长度时,位于基层层底的拉应力云图如图 11 所示.

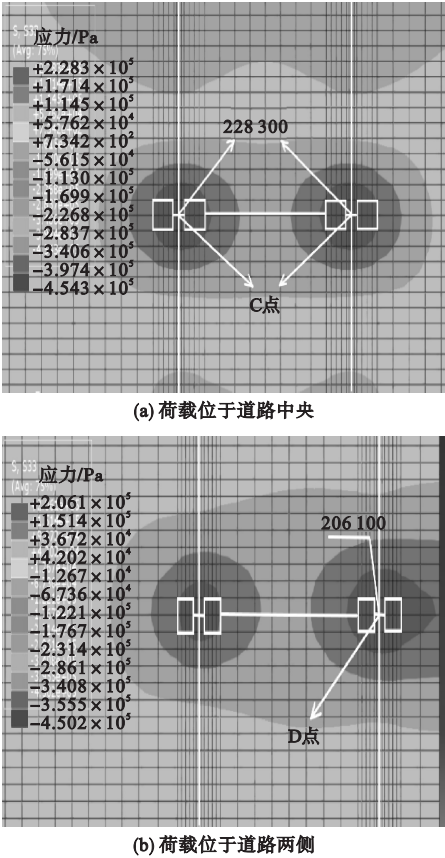


图 11 基层层底拉应力云图

Fig. 11 Contour plots of tensile stress at the bottom of base layer

从图 11 可以看出,当行车荷载行驶到预定轨迹一半长度时,在沥青路面基层层底产生的拉应力主要分布于轮胎与地面的接触面正下方.当荷载作用在道路中央时,轮组的轮隙中心正下方的拉应力最大,向外逐渐减小.因为荷载是对称的,所以两个轮组正下方的拉应力严格对称相等;当荷载作用于道路两侧时,基层层底的最大拉应力产生于靠近路边缘轮组的轮隙中心正下方,靠近路边缘的轮组下方产生的基层层底拉应力整体上大于靠近路中线轮组下方产生的基层层底拉应力.分别取图 11(a)中基层层底拉应力最大的点作为参考点 C、图 11 的(b)中基层层底拉应力最大的点作为参考点 D.建立 C、D 两点受到的拉应力时程曲线(见图 12).

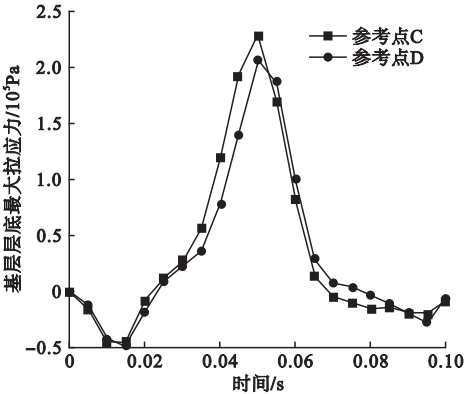


图 12 参考点 C、D 拉压应力时程变化曲线

Fig. 12 Time history curves of tensile and compressive stresses at reference points C and D

经对比发现,C、D 两点受到的基层层底拉应力随时间变化的趋势基本一致,在移动荷载开始逐渐靠近参考点时,参考点所在位置受压应力,压力大小随着荷载逼近逐渐增大,后又减小至 0.当荷载进一步靠近参考点上方时,参考点所在位置所受的拉应力快速增大,当荷载作用于参考点正上方时基层层底拉应力达到峰值.之后随着荷载移动,参考点位置处的基层层底拉应力快速减小到 0,并会转化为压应力,最终随着荷载的远离应力趋近于 0.在开始受压的阶段,C、D 两点处应力大小差距很小,在之后的受拉阶段,C 点处的拉应力都大于 D 点处的拉应力.拉应力达到最大之后,D 点处的拉应力基本都大于 C 点处的拉应力,最后转变为受压阶段,二者应力大小差距很小.移动荷载作用于路中央时,在 C 点产生的最大基层层底拉应力为 2.28×10^5 Pa,大于移动荷载作用于路两侧时在 D 点产生最大的基层层底拉应力 2.061×10^5 Pa.

每隔 0.01 s 提取一次基层层底最大拉应力,得到不同时刻层间最大基层层底拉应力变化曲线如图 13 所示.从图中可以看出,在控制其他因素相同的前提下,各时间点沥青路面在移动荷载作用下产生的基层层底拉应力随摩擦系数的增大而减小.换言之,其他条件相同,沥青路面基面层间的连接状态越好,在荷载作用下所受到的层底拉应力就越小.

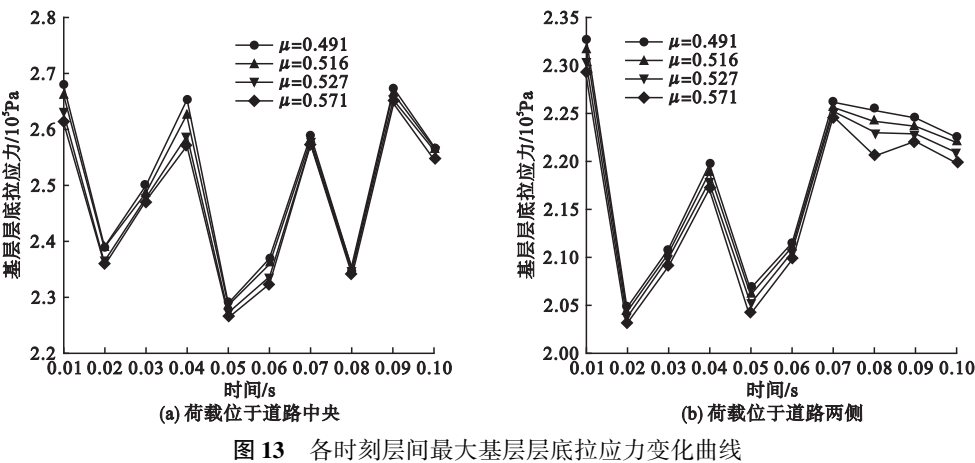


图 13 各时刻层间最大基层层底拉应力变化曲线

Fig. 13 Change curves of maximum tensile stress at the bottom of the base at each time

计算得到每一种接触状态下各时刻最大基层层底拉应力平均值,结果见表 4. 基层层底拉应力平均值随摩擦系数变化曲线见图 14.

表 4 各连接状态下最大基层层底拉应力平均值
Table 4 Average value of maximum tensile stress under various connecting status 10^5 Pa

荷载位置	最大基层层底拉应力平均值			
	$\mu = 0.491$	$\mu = 0.516$	$\mu = 0.527$	$\mu = 0.571$
路中央	2.506	2.496	2.480	2.469
路两侧	2.184	2.178	2.169	2.160

经过线性插值,得出两模型基层层底最大拉应力平均值随摩擦系数变化的函数如图 14 所示. 比较两个函数的斜率, $|K_{\text{路中央}}| = 0.469\ 4 > |K_{\text{路两侧}}| = 0.305\ 5$, 可以得出不同基层层间接触状态下的基层层底拉应力的差异性,在路面两侧位置时略微小于位于路面中间位置.

3 结 论

(1) 行车荷载位于路中央所产生的竖向剪应力和基层层底拉应力均比荷载位于路两侧时大,所以在路中央行车对路面结构的不利影响比在路两侧行车更大.

(2) 橡胶沥青封层的摩擦系数最大,乳化沥青碎石封层、稀浆封层、热沥青碎石封层次之.

(3) 下封层的摩擦系数越大,沥青路面在移动荷载作用下产生的最大竖向剪应力与最大基层层底拉应力越小,对路面结构产生的危害越小.

(4) 不同基层层间接触状态下的竖向剪应力的差异性,荷载位于路面两侧位置时大于位于路面中间位置. 不同基层层间接触状态下的基层层底拉应力的差异性,荷载位于在路面两侧位置时略微小于位于路面中间位置.

参考文献

[1] 胡长顺,王秉刚. 复合式路面设计原理与施工

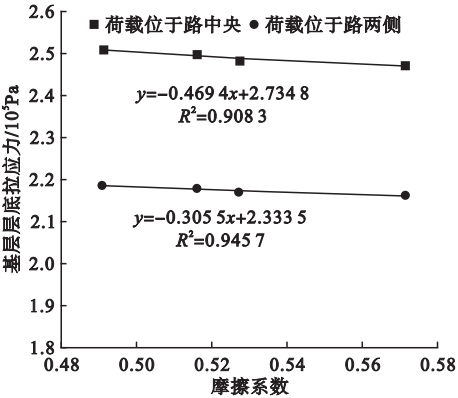


图 14 基层层底最大拉应力平均值随摩擦系数变化曲线

Fig. 14 The curves of the average value of the maximum tensile stress of the base course varying with the friction coefficient

分析发现当移动荷载位于道路中央时,在层间产生的基层层底拉应力整体上大于移动荷载在路两侧产生时的基层层底拉应力.

- 技术[M].北京:人民交通出版社,1999.
(HU Changshun, WANG Binggang. Principles and construction techniques of composite pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.)
- [2] 朱洪洲,朱真景. 沥青路面层间结合状态对路面受力状态的影响综述[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 69-75.
(ZHU Hongzhou, ZHU Zhenjing. Review of influence of interlayer combination state on pavement stress state of asphalt pavement[J]. Chinese and foreign highway, 2018, 38(4): 69-75.)
- [3] 赵艳玲,李庆杰,刘永超. 层间结合条件对半刚性基层沥青路面路用性能的影响研究[J]. 中外公路, 2017(5): 79-84.
(ZHAO Yanling, LI Qingjie, LIU Yongchao. Study on the influence of interlayer bonding conditions on pavement performance of semi-rigid base asphalt pavement[J]. Chinese and foreign highway, 2017(5): 79-84.)
- [4] 罗要飞,张争奇,张苛. 车辆超载作用下层间接触条件变化对沥青路面性能的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(4): 552-558.
(LUO Yaofei, ZHANG Zhengqi, ZHANG Ke. Impact of interlayer condition on performance of asphalt pavement based on vehicle overloading[J]. Journal of Wuhan university (engineering edition), 2016, 49(4): 552-558.)
- [5] 罗要飞,张争奇,杨博,等. 层间接触条件对沥青路面结构性能的影响[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 109-113.
(LUO Yaofei, ZHANG Zhengqi, YANG Bo, et al. Influences of interlayer contact conditions on structural properties of asphalt pavement[J]. Chinese and foreign highway, 2015, 35(5): 109-113.)
- [6] 龚红仁,邹晓翎,朱洪洲,等. 层间状态对沥青路面疲劳开裂与位移的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 66-70.
(GONG Hongren, ZOU Xiaoling, ZHU Hongzhou, et al. Influence of interfacial bond on fatigue crack and displacement of asphalt pavement[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2012, 34(12): 66-70.)
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
(Ministry of Transport of the People's republic of China. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing: The People's Communications Press, 2017.)
- [8] 郭寅川,申爱琴,张金荣,等. 沥青路面下封层力学响应及抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 20-26.
(GUO Yinchuan, SHEN Aiqin, ZHANG Jinrong, et al. Shear strength test and mechanical response of lower seal coat for asphalt pavement[J]. Chinese journal of highways, 2010, 23(4): 20-26.)
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
(Ministry of Transport of the People's republic of China. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: The People's Communications Press, 2011.)
- [10] KARLSSON, SORENSE. ABAQUS VERSION 6.1.14. Abaqus User Subroutines Reference Guide 1.1.41[R]. Providence, RI, 2014.
- [11] 刘俊卿,王保实,陈诚,等. 车辆荷载作用下沥青混凝土路面结构的应力响应分析[J]. 公路, 2011(6): 19-24.
(LIU Junqing, WANG Baoshi, CHEN Chengcheng, et al. Dynamic response analysis of stress in asphalt concrete pavement structure under vehicle load[J]. Highway, 2011(6): 19-24)
- [12] 董泽蛟,潘小康,邵显智,等. 温度场及非均布移动荷载作用下沥青路面力学响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 740-746.
(DONG Zejiao, PAN Xiaokang, SHAO Xianzhi, et al. Dynamic response analysis of asphalt pavement due to combined non-Uniform moving load and temperature distribution[J]. Journal of Tongji university (natural science edition), 2016, 44(5): 740-746.)
- [13] 李友云,罗磊,胡迪,等. 基于荷载影响区域下不同形状轮载的等效性[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(3): 57-66.
(LI Youyun, LUO Lei, HU Di, et al. Equivalence about different shapes of wheel loads with influence area[J]. Journal of Changsha university of technology (natural science edition), 2018, 15(3): 57-66.)
- [14] 黄晓明. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
(HUANG Xiaoming. Road Subgrade and Pavement Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2017.)
- [15] 廖公云,黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 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.)
- [16] 苏凯,孙立军. 沥青路面车辙产生机理[J]. 石油沥青, 2006, 20(4): 1-7.
(SU Kai, SUN Lijun. Rutting mechanism of asphalt pavement[J]. Petroleum asphalt, 2006, 20(4): 1-7.)
- [17] 李星,刘志芳,宋晓燕. 层间接触对半刚性沥青路面力学性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 44-48.
(LI Xing, LIU Zhifang, SONG Xiaoyan. Influence of interlayer contact on the mechanics behavior of semi-rigid asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science edition), 2014, 33(2): 44-48.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)