

移动荷载下不同基面层间损伤状态的沥青路面力学响应分析

张敏江¹, 于江¹, 郭超²

(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 研究移动荷载大小及连接层材料初始损伤状态对路面结构力学响应的影响。方法 基于 Cohesive 单元的双线性内聚力本构模型, 建立连接层材料渐进损伤的数学模型, 进一步推导不同初始损伤状态连接层的刚度与强度, 建立移动荷载作用下不同的连接层初始损伤状态的沥青路面结构有限元分析模型。结果 移动荷载的竖向分荷载越大, 基面层间所受的剪切应力越大, 基层底的拉应力越大, 连接层内产生的损伤越严重; 移动荷载的水平分荷载越大, 基面层间所受的剪切应力越大, 连接层内产生的损伤越严重, 但对基层层底所受的拉应力大小影响微弱; 连接层内的初始损伤因子越大, 移动荷载作用下基层层底产生的拉应力越大。当连接层完全失效时, 荷载作用下产生的基层层底拉应力较连接层未发生损伤时增加 21.28% ~ 34.28%; 连接层初始损伤因子越大, 荷载作用下再次产生的损伤的程度越低。结论 沥青路面所受荷载的大小及连接层初始损伤程度均会对路面的力学响应特征产生较大的影响。

关键词 沥青路面; 移动荷载; 连接层; 损伤失效; 力学响应

中图分类号 TU317.3 文献标志码 A

Investigation on Mechanical Response of Asphalt Pavement with Different Interlayer Damage State under Moving Load

ZHANG Minjiang¹, YU Jiang¹, GUO Chao²

(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 influence of the moving load and the initial damage state of the connecting layer on the mechanical response of the pavement structure, based on the bilinear cohesive constitutive model, a mathematical model of progressive damage of connecting layer is established, which under different initial damage states its stiffness and strength are deduced, and a

收稿日期: 2020-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008269)

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

finite element model of asphalt pavement structure at different initial damage states is established under moving load. The results show that the larger the vertical component load of the moving load is, the greater the shear stress between the base layers is, the greater the tensile stress at the bottom of the base layer is, the more serious the damage of the connecting layer is; the larger the horizontal component load of the moving load is, the greater the shear stress between the base layers is, the more serious the damage of the connecting layer is, but the influence on the tensile stress at the bottom of the base layer is weak; the more serious the damage of the connecting layer is, the greater the tensile stress of the base layer bottom under the action of moving load is. When the connecting layer fails completely, the bottom tensile stress of the base layer under the load is 21.28% - 34.28% higher than that when the connecting layer is not damaged; the higher the damage degree of the connecting layer, the lower the damage degree of the second generation under the load. The conclusion is that the load on asphalt pavement and the initial damage of connecting layer have great influence on the mechanical response of asphalt pavement.

Key words: asphalt pavement; moving load; connecting layer; damage failure; mechanical response

无机结合料稳定类基层沥青路面在我国高等级公路沥青路面中应用广泛^[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,会使基面层间连接状况较差,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]。黄优等^[3]使用 Bisar3.0 程序对标准荷载下刚柔复合式路面进行了力学分析,结果指出路面结构的层间连接效果越好,层间最大剪应力值及层间剪应力突变值越小,对路面益处越大。Chun Sanghyun 等^[4-5]建立了数值模型,在模型面层与基层间插入界面弹簧单元,赋予其法向与切向刚度,模拟车辆荷载下路面的力学响应,结果表明良好的连接层状态可以提高层间抗滑移性能,并延长路面的使用寿命。龚红仁等^[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,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力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,不能反映荷载作用所导致的连接层的损伤,也不能反应连接层自身刚度对荷载传递的影响。李彦伟等^[7-8]基于分层失效理论分析了固定位置的静态荷载对带有连接层的路面结构的影

响,周晓和等^[9]分析了连接层的初始损伤,但只考虑了作用于路面固定位置的静态荷载,真实情况中车辆荷载是移动的,并且由于车轮与路面之间的摩擦,荷载方向并不垂直于路表面。为了更加逼近真实的路面受力状况,有必要施加移动荷载。笔者通过获取沥青路面基层与面层间连接层的材料参数,建立数值模型,用 Cohesive Surfaces 表征路面基层与面层之间的连接层。赋予连接层法向与切向的刚度,用双线性损伤本构描述连接层弹性变形 - 损伤 - 失效的过程,并推导连接层不同初始损伤状态下的双线性内聚力损伤本构的参数。用库伦摩擦模型描述连接层破坏之后的层间状态。开发 DLOAD 与 UTRACLOAD 子程序分别给路面施加竖直与水平方向的移动荷载。研究移动荷载大小及连接层初始损伤状态对路面结构力学响应的影响。

1 理论基础

1.1 双线性内聚力本构模型

在内聚力模型中,假设裂纹尖端正在发生断裂的区域为内聚力区域(见图 1)。它覆盖了从具有最大牵引力的内聚力区尖端到具有零内聚力的裂纹尖端的区域。图中的 T/τ 与 δ_n 分别为内聚力与位移,内聚力由裂纹尖端向内

聚力区尖端线性增大,内聚力区域的位移与内聚力的关系可用内聚力模型来描述^[10]。

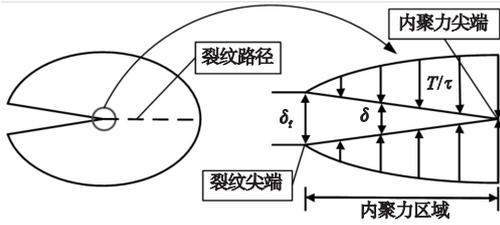


图1 内聚力模型示意图

Fig. 1 Characterization of the cohesive zone model

图2为双线性内聚力模型的内聚力-位移曲线。 T/τ 为法向与切向内聚力; δ 为断裂面的相对位移; T_c/τ_c 为法向与切向的损伤起始应力; δ_0 为损伤起始位移; δ_f 为单元失效位移; G 为连接层材料的断裂能。从图2可以看出,随着法向位移的增加,内聚力也随之线性增加,当达到损伤起始应力后又随法向位移的增大而线性减小,最后衰减到零。

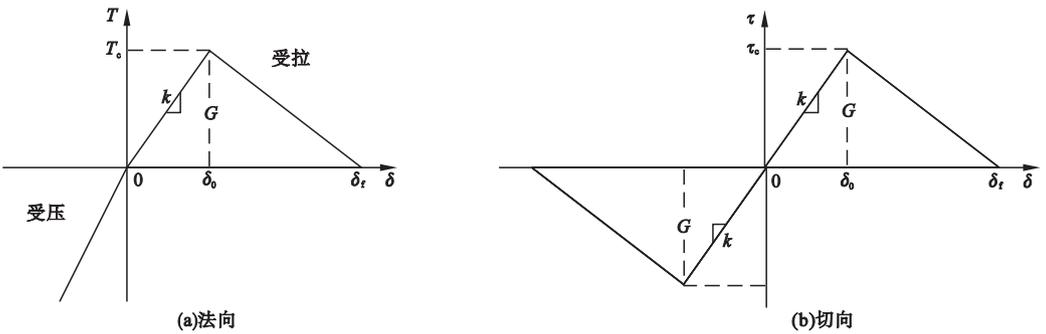


图2 双线性内聚力模型的内聚力-位移曲线

Fig. 2 Curve of cohesive force and displace for bilinear cohesive constitutive model

以法向为例,双线性内聚力模型中内聚力与断裂面相对位移的关系为

$$t(\delta) = \begin{cases} \frac{T_c \delta}{\delta_0}, & \delta \in [0, \delta_0); \\ \frac{T_c(\delta_f - \delta)}{\delta_f - \delta_0}, & \delta \in [\delta_0, \delta_f]. \end{cases} \quad (1)$$

双线性内聚力模型断裂能与内聚力和断裂面相对位移的关系为

$$G = \frac{1}{2} \delta_f T_c. \quad (2)$$

在断裂面相对位移达到 δ_0 之前,材料为线弹性,刚度为 k 。在断裂面相对位移在 δ_0 与 δ_f 之间时,材料进入损伤阶段,刚度折减。当断裂面相对位移大于 δ_f 时就会发生断裂。ABAQUS中使用损伤因子 D 描述材料的损伤程度^[10],其变化过程:

$$D = \frac{\delta_f(\delta - \delta_0)}{\delta_{\max}(\delta_f - \delta)}. \quad (3)$$

δ_{\max} 为断裂过程中断裂面各方向相对位移的矢量和。损伤阶段的 δ_{\max} 位于 δ_0 与 δ_f

之间,随着损伤的演化, δ_{\max} 的值逐渐从 δ_0 增加到 δ_f ,在此过程中 D 值从0增加到1。当 $D=0$ 时表示内聚力模型区域的材料未发生损伤,当 $D=1$ 时内聚力模型区域内的单元已经失效,该区域发生断裂分离。

1.2 不同初始损伤状态的连接层本构模型

不同道路的使用时间不同,环境因素及车辆荷载对路面造成的影响也不同,所以路面连接层材料的状态也不同。新建道路路面连接层材料力学性能良好,刚度未退化,当道路使用一段时间之后,连接层可能出现了损伤,甚至失效,此时连接层刚度下降或完全丧失,层间抵抗变形的能力降低,路面结构在行车荷载及环境因素的作用下会发生更严重的病害。

图3为使用初始损伤因子 d 描述沥青路面连接层的初始损伤状态^[11-13]; T_c^d 与 τ_c^d 为初始损伤为 D 时法向与切向的损伤起始应力; δ_0^d 与 k^d 为初始损伤为 d 时连接层的损伤

起始位移与刚度。当 $d=0$ 时,连接层未发生损伤,刚度未下降,此时刚度为 k ;当 $0 < d < 1$ 时,连接层材料已经损伤,刚度下降且不可恢

复,此时刚度为 k^d ;当 $d=1$ 时,连接层失效,刚度为 0,基层与面层分离。

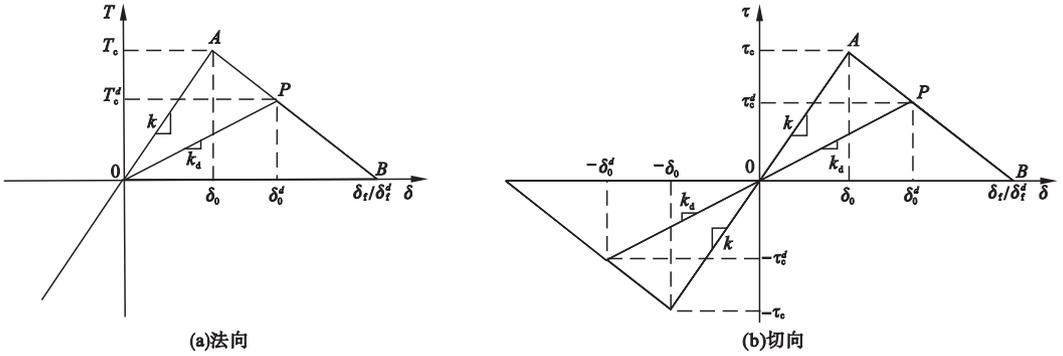


图3 不同连接层初始损伤状态的内聚力本构关系的力-位移曲线

Fig. 3 Curve of force and displace for connecting layer at different initial damage states

由式(3)可知初始损伤因子 d

$$d = \frac{\delta_f(\delta_0^d - \delta_0)}{\delta_0^d(\delta_f - \delta_0)}. \quad (4)$$

根据 $A(\delta_0, T_c)$ 、 $B(\delta_f, 0)$ 两点坐标可推得直线 AB 的表达式,将 P 点横坐标代入便可获得 T_c^d 的值:

$$T_c^d = T_c - d \frac{T_c \delta_0^d}{\delta_f}. \quad (5)$$

将式(5)右侧除以 δ_0^d 并与式(4)联立消除 δ_0^d ,可得 k 与 k^d 的关系:

$$k^d = (1-d) \frac{T_c}{\delta_0} = (1-d)k. \quad (6)$$

由式(4)、(5)、(6)可知,当初始损伤因子 d 在 $0 \sim 1$ 时,连接层材料内聚力本构:

$$\begin{cases} \delta_f^d = \delta_f, \\ T_c^d = T_c - d \frac{T_c \delta_0^d}{\delta_f}, \\ k^d = (1-d)k. \end{cases} \quad (7)$$

当 $d=1$ 时,连接层材料失效,此时用库伦摩擦模型表征面层与基层的层间行为。

1.3 连接层刚度

引用赵炜诚等^[14]的层间界面刚度的计算方法。其中连接层的法向刚度 k_n 与切向刚度 k_s 为

$$k_n = \frac{1}{\frac{1}{S_u} + \frac{1}{S_f} + \frac{1}{S_b}}. \quad (8)$$

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{K_u} + \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_b}}. \quad (9)$$

式中: S_u 、 S_f 、 S_b 与 K_u 、 K_f 、 K_b 各自是不考虑层间粘结效果的面层、基层及连接层材料的法向与切向刚度:

$$\begin{cases} S_u = \frac{2E_1(1-\mu_1)}{h_1(1-\mu_1-2\mu_1^2)}, \\ S_f = \frac{2E_2(1-\mu_2)}{h_1(1-\mu_2-2\mu_2^2)}, \\ S_b = \frac{2E_3(1-\mu_3)}{h_3(1-\mu_3-2\mu_3^2)}. \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} K_u = \frac{2G_1(1-\mu_1)}{h_1(1-\mu_1-2\mu_1^2)}, \\ K_f = \frac{2G_2(1-\mu_2)}{h_1(1-\mu_2-2\mu_2^2)}, \\ K_b = \frac{2G_3(1-\mu_3)}{h_3(1-\mu_3-2\mu_3^2)}. \end{cases} \quad (11)$$

式中: E_1 、 μ_1 、 h_1 依次为沥青混凝土面层的回弹模量、泊松比及厚度; E_2 、 μ_2 、 h_2 依次为半刚性基层的回弹模量、泊松比、厚度; E_3 、 μ_3 、 h_3 依次为连接层的回弹模量、泊松比、厚度; G_1 、 G_2 、 G_3 分别为沥青混凝土面层、半刚性基层及连接层的剪切刚度。

$$\begin{cases} G_1 = \frac{E_1}{2(1+\mu_1)}, \\ G_2 = \frac{E_2}{2(1+\mu_2)}, \\ G_3 = \frac{E_3}{2(1+\mu_3)}. \end{cases} \quad (12)$$

2 数值模型的建立

2.1 连接层的路面结构数值模型

根据我国高速公路及一级公路中常用的路面结构设计,确定各结构层参数。并假设面层为 AC-20,连接层为橡胶改性沥青,基层与底基层所选用的材料为水泥稳定碎石。路面结构及材料参数如表 1 所示。

表 1 沥青路面结构材料参数

Table 1 Material parameters of asphalt pavement

结构层	回弹模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	厚度/cm
面层	1 300	0.30	2 400	18
基层	1 500	0.25	2 300	20
底基层	1 500	0.25	2 300	20
土基	65	0.40	1 800	—

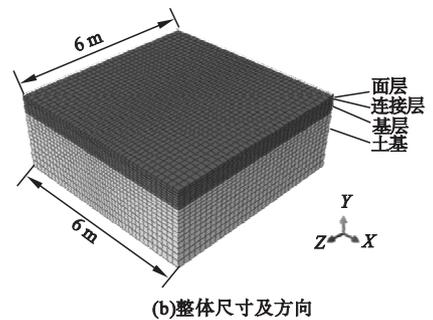
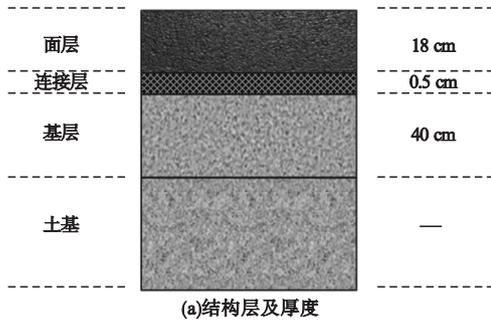


图 4 含连接层的路面结构的数值模型

Fig. 4 Numerical model of pavement structure with connecting layer

2.2 施加移动荷载

分别编写 DLOAD 以及 UTRACLOAD 子程序,其中 DLOAD 子程序用于实现竖向移动荷载的施加,而 UTRACLOAD 子程序则是用于实现水平方向移动荷载的施加。为使荷载移动,须在有限元模型上设置与单个车

根据式(11)至(15)计算胶粉改性沥青连接层的刚度,法向刚度记为 k_n ;切向刚度记为 k_s 。计算使用的结构层参数为静态参数^[9]。根据锥入度试验测得胶粉改性沥青的强度,法向损伤起始应力记为 T_c ;切向损伤起始应力记为 τ_c 。根据 DSR 试验测得胶粉改性沥青的失效位移^[7,8,15],未发生损伤的连接层材料参数如表 2 所示。

表 2 未发生损伤的连接层材料参数

Table 2 Material parameters of connecting layer without damage

$k_n/10^9$ (Pa·m ⁻¹)	$k_s/10^9$ (Pa·m ⁻¹)	$T_c/10^4$ Pa	$\tau_c/10^4$ Pa	δ/mm
9.99	3.86	5.83	5.83	2

考虑连接层的路面有限元模型如图 4 所示。为了重点研究连接层,假设基层、底基层、土基之间完全连接。模型底部设置完全约束,对基层与土基的与行车方向平行的两侧面施加 x 方向的约束,对面层、基层与土基的与行车方向垂直的两侧面施加 z 方向的约束。数值模型的求解利用 ABAQUS/Standard 求解器的隐式动力学算法,单元类型为 C3D8R。

轮荷载作用宽度相同的轨迹带,将其分为一尺寸的小矩形^[16](见图 5)。

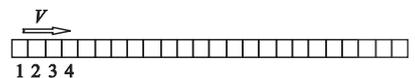


图 5 荷载移动带

Fig. 5 Moving band of load

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^[17]。依次进行多个类似的过程便可以模拟移动荷载的作用效果。

车轮荷载作用的位置如图6所示,荷载行驶的路程是3 m,设定行车速度为30 m/s,那么荷载作用的时长为0.1 s,荷载作用区域坐标系 $x=3$ 与 $z=3$ 轴对称,移动方向与坐标系的 z 轴方向相反。

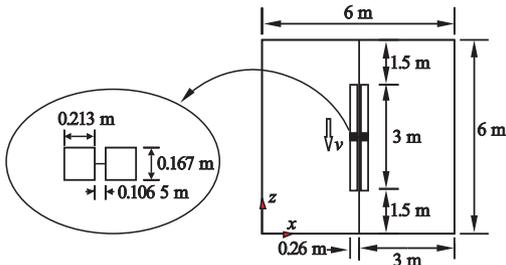


图6 路表面移动荷载作用位置示意图

Fig.6 Diagram of location of moving load on road surface

3 荷载水平对路面结构的影响

3.1 水平力系数对路面力学行为的影响

施加大小为0.7 MPa的竖向移动荷载,水平力系数 c (水平荷载与竖向荷载的比值)从0增加到50%,为10%。具体荷载水平如表3所示。图7为移动荷载行驶过后连接层损伤状态的损伤因子云图。

表3 不同水平力系数的荷载工况

Table 3 Load cases with different horizontal force coefficients

$c/\%$	竖向荷载/MPa	水平荷载/MPa
0	0.7	0
10	0.7	0.07
20	0.7	0.14
30	0.7	0.21
40	0.7	0.28
50	0.7	0.35

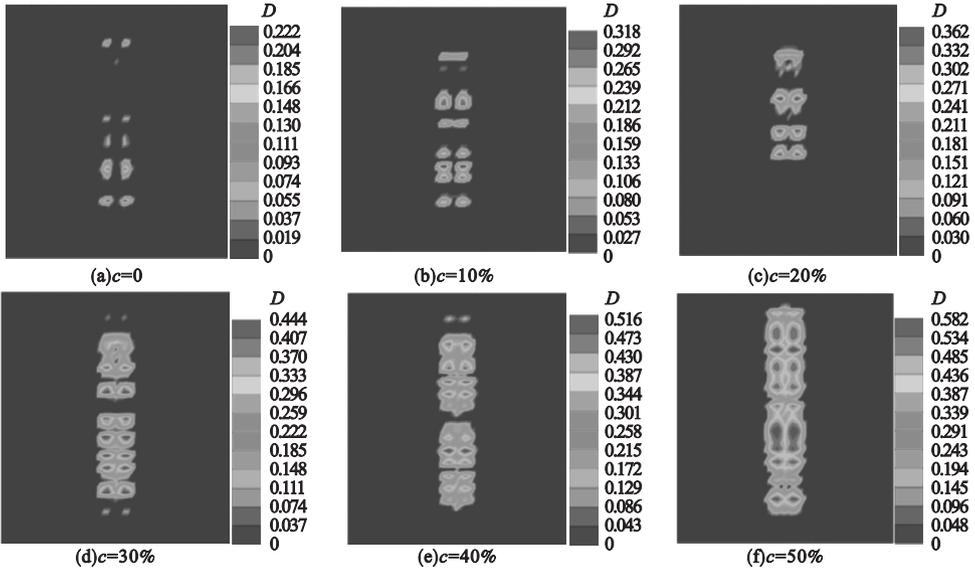


图7 不同水平力系数下连接层损伤状况

Fig.7 Damage conditions of connecting layer under different horizontal force coefficients

由图7可知,控制其他因素不变,施加在路表的水平力越大,连接层的损伤面积越大,连接层损伤区域内的最大损伤因子也会越大。

6种不同水平力系数的连接层的最大损伤因子及荷载作用过程中基层底部出现的最

大拉应力值见图7。在6种工况的计算结果中,每隔0.01是提取一次连接层内剪切应力及基层底拉应力,获得每种工况的平均应力及最大应力(见图8)。从图8中可以看出,水平力的大小对连接层内的剪切应力影响较大,对基层底部的拉应力分布影响很微弱。路表施

加水力越大,连接层的剪切应力越大而基层

底拉应力基本不受路表面剪切荷载的影响。

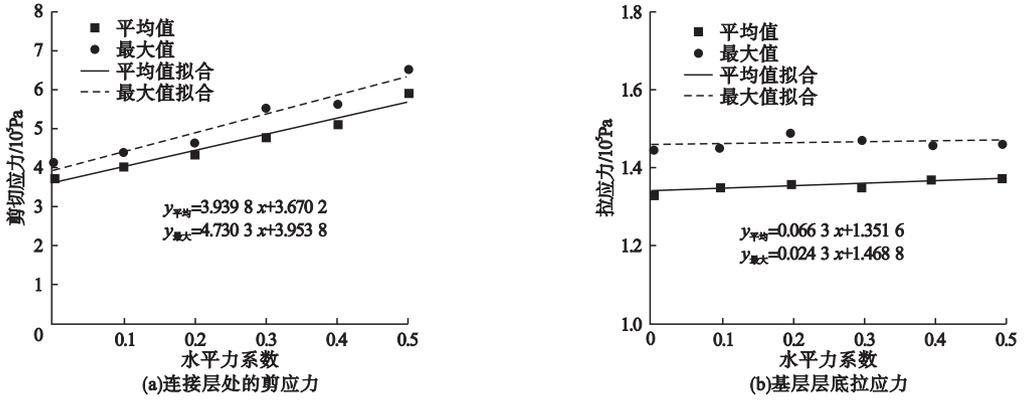


图8 不同水平力系数工况的路面结构受力

Fig. 8 Stress condition of pavement structure under different coefficients of horizontal force conditions

3.2 竖向荷载对路面力学行为的影响

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)规定计算标准车轮荷载为0.7 MPa,但由于超载现象对沥青路面结构损害严重,笔者分析超载对路面连接层及结构层的影响。设定水平荷载为0.1 P, P 为标准荷载(P =

0.7 MPa),改变竖向荷载的大小,分别设定竖向荷载大小从 P 以 0.2 P 的增量递增至 2.6 P 竖向荷载工况。不同的竖向荷载作用过后连接层内损伤状况如图 9 所示。在水平荷为 0.07 MPa, 竖向荷载的变化如表 4 所示。

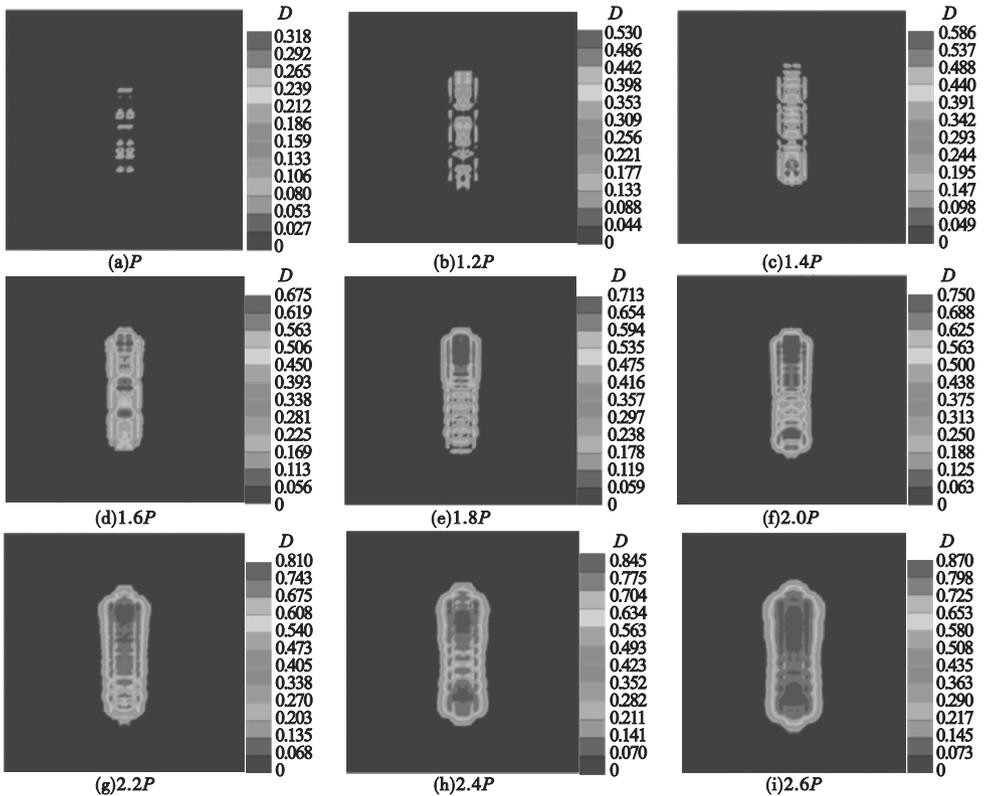


图9 不同竖向荷载作用后连接层内损伤云图

Fig. 9 Nephograms of damage in connecting layer under different vertical loads

表4 竖向荷载

Table 4 Vertical load condition

竖向荷载工况	水平荷载/MPa	竖向荷载/MPa
P	0.07	0.70
$1.2 P$	0.07	0.77
$1.4 P$	0.07	0.84
$1.6 P$	0.07	0.91
$1.8 P$	0.07	0.98
$2.0 P$	0.07	1.05
$2.2 P$	0.07	1.12
$2.4 P$	0.07	1.19
$2.6 P$	0.07	1.26

各级别的竖向荷载作用过后连接层内出现的最大损伤因子值见图9。提取每个分析

步结束后连接层内剪切应力及基层层底拉应力,其每种工况的平均应力值及最大应力值如图10所示。从图9可以看出,竖向荷载越大,连接层内所能达到的最大损伤因子越大,连接层越趋近于失效破坏。从图10可以看出,竖向荷载越大,荷载施加过程中的连接层内剪切应力与基层底拉应力的平均值越大、连接层内剪切应力与基层底拉应力所能达到的最大值也越大。比较图10及线性插值获得的曲线 $y_{平均}$ 与 $y_{最大}$ 的倾斜程度可知,与连接层内剪切应力与基层底拉应力的平均值相比,荷载施加历程中的连接层内剪切应力与基层底拉应力的最大值较平均应力随垂直荷载的增大而增大的趋势更为强烈。

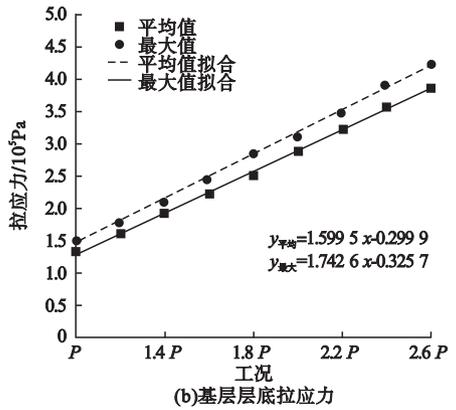
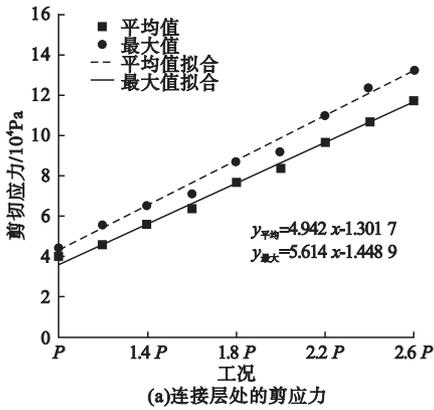


图10 不同竖向荷载作用后连接层内最大损伤因子

Fig. 10 Stress in connecting layer under different vertical loads

3.3 连接层初试损伤对路面力学行为的影响

不同连接层损伤状态对路面结构的性能影响很大,故应该研究移动荷载作用下不同连接层损伤状态对路面结构的力学行为的影响,拟定不同初始损伤程度的连接层材料的参数,笔者设定初始损伤因子 d 的值分别为

0、0.2、0.4、0.6、0.8、1。其中 $d=0$ 时连接层内无初始损伤, $d=1$ 时连接层已经失效,用库伦摩擦模型表征此时的层间状态。根据式(8)确定不同初始损伤因子对应的连接层刚度及损伤起始应力(见表5)。

表5 不同初始损伤状态下连接层的刚度及损伤起始应力

Table 5 Stiffness and damage stress in connecting layer under different initial damage conditions

初始损伤因子	$K_s/10^9$ (Pa·m ⁻¹)	$K_n/10^9$ (Pa·m ⁻¹)	$\tau_c/10^4$ Pa	$T_c/10^4$ Pa
0	3.860	9.990	5.830	5.830
0.2	3.088	7.992	5.819	5.825
0.4	2.316	5.994	5.800	5.818
0.6	1.544	3.996	5.764	5.804
0.8	0.772	1.997	5.659	5.762
1	0	0	0	0

改变不同竖向荷载,研究不同大小竖向荷载作用下不同连接层初始损伤状态的基层底部拉应力的变化,每隔 0.01s 提取一次计算结果,获得的基层底部拉应力随荷载作用

时间的变化如图 11 所示。提取不同大小的移动荷载作用在各损伤状态路面的过程中各时刻的基层底拉应力的平均值与最大值,对结果进行插值(见图 12)。

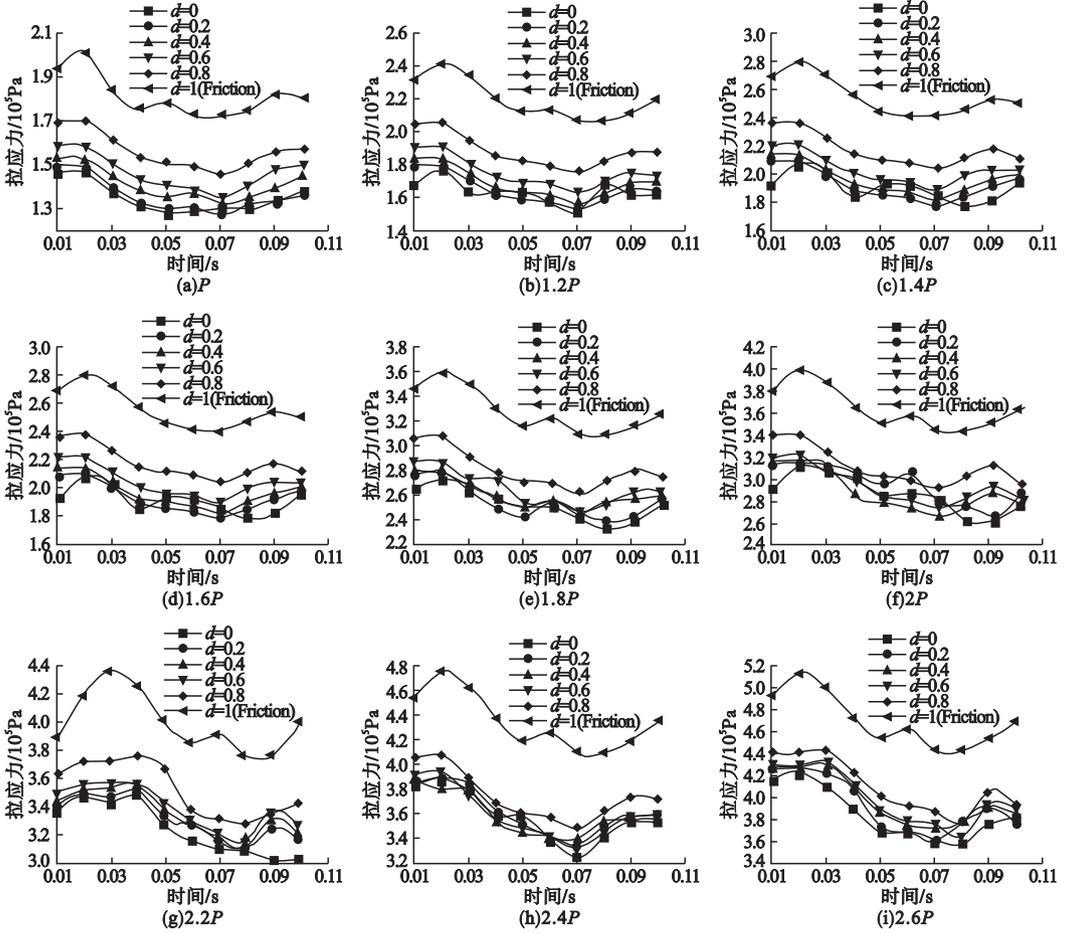


图 11 动态荷载作用下不同初始损伤状态路面结构基层底最大拉应力变化

Fig. 11 Evolution of the maximum tensile stress in the base course of pavement structure under moving load

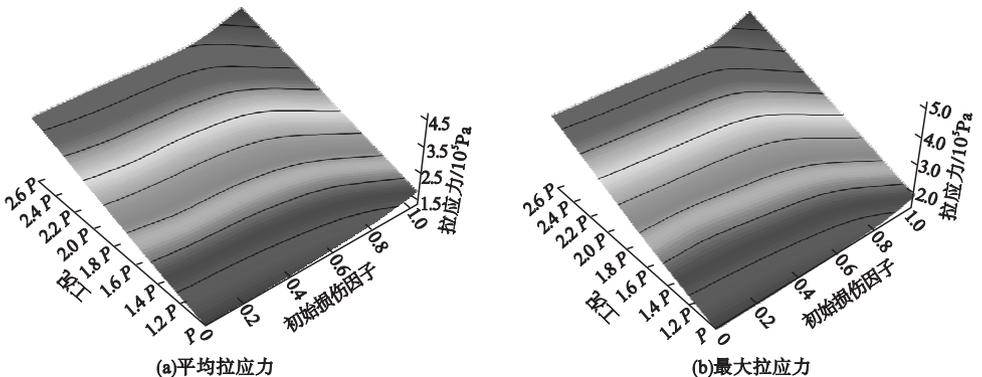


图 12 移动荷载作用过程中各工况基层底最大拉应力的最大值与平均值

Fig. 12 Maximum and average value of the maximum tensile stress at the bottom of the base course under various working conditions during the moving load

从图 11 与图 12 可以看出,竖向荷载大小一致的情况下,连接层的初始损伤越严重,连接层的刚度越小,基层底受到的拉应力越大。竖向荷载越大,基层底的拉应力越大。以竖向荷载大小为 0.7 MPa 为例,当连接层的初始损伤因子分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 及 1(连接层失效)时,在移动荷载作用下各时刻的基层底的最大拉应力的平均值分别为 135 300 Pa、136 100 Pa、143 100 Pa、146 400 Pa、156 400 Pa 及 181 100 Pa。当初始损伤因子为 0.2、0.4、0.6、0.8 时基层层底的最大拉应力平均值依次比连接层未发生损伤时大 0.59%、5.76%、8.20% 及 15.59%。当连接层完全失效后,路面面层与路面基层已经分层脱离面层与基层属于摩擦接触,荷载作用下基层底的最大拉应力平均值比连接层未发生损伤时增加 21.28%~34.28%,这会严重削弱路面结构的抗病害能力。此外,当初始损伤因子在 0~0.6 时,各时刻基层底拉应力大小并不完全根据损伤程度的轻重排列,因为初始损伤较小的连接层刚度较大,变形时产生的应力较大,荷载作用下连接层内个别位置容易再次产生更严重的损伤,这种现象在竖向荷载相对较大时尤为明显。

提取各种工况作用过后的路面结构连接层内的损伤状况如图 13 所示。

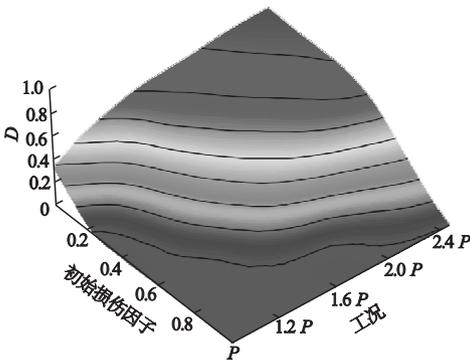


图 13 荷载大小与初始损伤程度对连接层内最大损伤因子的影响

Fig. 13 Impact of load and initial damage on the maximum damage factor in the connecting layer

从图 13 可以看出,初始损伤越严重,荷

载作用下连接层越不容易再次产生损伤。当竖向荷载为 700 000 Pa 时,只有初始损伤因子为 0 的连接层会产生损伤,初始损伤为 0.2、0.4、0.6、0.8 的连接层均未产生损伤,只有增加荷载的大小才能使有一定初始损伤程度的连接层再次产生损伤,这也说明车辆不超载的情况下,路面结构的连接层只会发生程度很小的损伤,之后便不易再次产生损伤,这与道路的真实使用情况相符合。

4 结 论

(1) 竖向移动荷载越大,荷载作用过程中基层底所受的拉应力就越大,基面层间受到的剪切应力就越大,连接层内产生的损伤也越严重。

(2) 切向移动荷载越大,荷载作用过程中的基面层间受到的剪切应力就越大,连接层内产生的损伤也会越大,但基层底的拉应力受水平分力的影响较小。

(3) 连接层的初始损伤越严重,对路面结构的性能削弱越严重,在移动荷载的作用下基层底受到的拉应力也会越大。当初始损伤因子为 1(连接层完全失效)时,在移动荷载作用下基层底所受的拉应力比未发生初始损伤的路面基层底所受的拉应力增加 21.28%~34.28%。

(4) 路面结构连接层内的初始损伤越严重,在荷载作用下再次产生损伤就越小。当初始损伤因子在 0~0.6 时,各时刻基层底拉应力大小并不完全根据损伤程度的大小排列,这是因为初始损伤较小的连接层刚度较大,变形时产生的应力较大,在荷载作用下连接层内更容易再次产生更严重的损伤。

参考文献

- [1] 章佩佳. 半刚性基层沥青路面对基层状况的荷载响应[J]. 公路交通技术, 2018, 34(2): 9-12.
(ZHANG Peijia. Load response of semi-rigid base asphalt pavement to base conditions [J]. Technology of highway traffic technology,

- 2018,34(2):9-12.
- [2] 张丽萍,吕馥宏,张敏江,等.下封层连接状况对沥青路面疲劳寿命的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(6):1036-1043.
(ZHANG Liping, Lü Fuhong, ZHANG Minjiang, et al. Influence of the lower seal coat connection effect on fatigue life of asphalt pavement [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (nature science), 2019, 35(6): 1036-1043.)
- [3] 黄优,刘朝晖,李盛,等.不同层间结合状态下刚柔复合式路面的剪应力分析[J].公路交通科技,2015,32(6):32-38.
(HUANG You, LIU Zhaohui, LI Sheng, et al. Analysis of shear stress of rigid-flexible composite pavement under different interlaminar bonding conditions [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2015, 32(6): 32-38.)
- [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(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(4): 552-558.)
- [5] CHUN S H, KIM K J, GREENE J, et al. Evaluation of interlayer bonding condition on structural response characteristics of asphalt pavement using finite element analysis and full-scale field tests [J]. Construction and building materials, 2015, 96: 307-318.
- [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] 李彦伟,穆柯,石鑫,等.沥青路面基层间结合状态的数值分析[J].天津大学学报,2012,45(5):461-467.
(LI Yanwei, MU Ke, SHI Xin, et al. Numerical analysis on cohesion between base and surface courses of asphalt pavement [J]. Journal of Tianjin university, 2012, 45(5): 461-467.)
- [8] 李彦伟,穆柯,石鑫,等.基层层间接触状态对沥青路面力学响应影响[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(2):38-44.
(LI Yanwei, MU Ke, SHI Xin, et al. Impact of base-surface contact conditions on mechanical response of asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2014, 34(2): 38-44.)
- [9] 周晓和,马大为,朱忠领,等.面基层间不同结合状态下发射场坪动态响应研究[J].兵工学报,2015,36(12):2269-2277.
(ZHOU Xiaohu, MA Dawei, ZHU Zhongling, et al. Research on dynamic response of launching site based on different interlayer binding states [J]. Acta armamentarii, 2015, 36(12): 2269-2277.)
- [10] 张东,黄晓明,赵永利.基于内聚力模型的沥青混合料劈裂试验模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2010(6):154-159.
(ZHANG Dong, HUANG Xiaoming, ZHAO Yongli. Simulation of indirect tension test of asphalt mixtures based on cohesive zone model [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2010(6): 154-159.)
- [11] PEREIRA K, WAHAB M A. Fretting fatigue lifetime estimation using a cyclic cohesive zone model [J]. Tribology international, 2020(141):105899.
- [12] 周正峰,蒲卓彬,唐基华.双线性黏聚区模型在混凝土路面损伤开裂分析中的应用[J].交通运输工程学报,2019,19(1):21-27.
(ZHOU Zhengfeng, PU Zhuobin, TANG Jihua. Application of bilinear cohesive zone model in damage and cracking analysis of concrete pavement [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2019, 19(1): 21-27.)
- [13] CAMANHO P P, DAVILA C G, DE MOURA M F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials [J]. Journal of composite materials, 2003, 37(16): 1415-1438.
- [14] 赵炜诚,许志鸿,黄文.混凝土面层与贫混凝土基层的层间作用对荷载应力和弯沉的影响[J].中国公路学报,2003(4):10-16.
(ZHAO Weicheng, XU Zhihong, HUANG Wen. Influence of load stress and deflection on interfacial interaction between portland concrete pavement and lean concrete base [J]. China journal of highway and transport, 2003(4): 10-16.)
- [15] 刘丽,郝培文,肖庆一,等.沥青胶浆高温性能及评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(5):30-34.
(LIU Li, HAO Peiwen, XIAO Qingyi, et al. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2007, 27(5): 30-34.)
- [16] 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.)
- [17] 李友云,罗磊,胡迪,等.基于荷载影响区域下不同形状轮胎的等效性[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.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)