

沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析

傅搏峰¹, 周志刚², 陈晓鸿¹, 吕贵宾³

(1. 同济大学交通运输工程学院 , 上海 200000 ; 2. 长沙理工大学公路学院 , 湖南 长沙 410076 ; 3. 山东路桥集团有限公司 , 山东 济南 250000)

摘 要 : 以比奥渗流固结理论和各向同性线弹性损伤理论及疲劳损伤理论为基础 , 提出沥青路面的水损害力学分析模型 , 运用轴对称有限元方法对力学模型进行求解 , 并编制有限元程序进行数值模拟分析 . 重点分析了孔隙水压力对沥青路面受力状态的影响 , 以及在有孔隙水存在的情况下沥青路面在车载作用下的疲劳损伤过程 . 计算结果表明 , 沥青面层内的孔隙水压力与面层的渗透系数、面层厚度以及车辆行驶速度等有密切关系 . 当路表孔隙饱水时 , 在荷载作用下 , 孔隙水的存在会导致路面结构应力集中加剧 , 在荷载的反复作用之下 , 导致疲劳开裂破坏 , 加速路表病害的出现 .

关键词 : 沥青路面 水损害 孔隙水压力 疲劳损伤 有限元法

中图分类号 : TP 273 ; TP 312 文献标识码 : A

0 引言

进入到沥青路面的自然水 , 在车辆交变荷载的作用下产生的超孔隙水压是一个不可忽视的因素 , 它不仅对沥青面层产生冲刷作用 , 还将产生一个附加应力 , 使孔隙加大 , 贯通形成宏观裂纹并逐渐扩展 , 加速面层的破坏 . 但究竟多大的孔隙水压力会造成路面结构的破坏 , 还是没有一个定量的概念 . 在它的作用之下 , 是如何改变沥青路面的破坏形式 ? 所有存在的这些问题表明 , 有必要建立沥青路面的水损害力学模型 , 对其在饱水状态下的疲劳破坏过程展开深入研究 .

目前有关交通荷载作用下路基路面层状弹性体系超孔隙水压力与疲劳损伤方面的综合分析 , 国内外还鲜有涉及 . 因此本文研究的在交通荷载作用下沥青路面结构产生的超孔隙水压力及疲劳损伤综合分析 , 不仅有一定的理论价值 , 而且也有一定的实际意义 .

1 沥青路面水损害过程有限元分析方法

1.1 渗流分析

本文以比奥固结渗流理论作为基本理论来进行渗流分析 .

比奥固结渗流理论的基本方程为

$$\begin{cases} -G \nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G \nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G \nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\nu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma \\ -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{K}{\gamma_w} \nabla^2 u = 0 \end{cases}$$

式中 : ∇^2 为拉普拉斯算子 , $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

在渗流分析的模型中 , 基于以下基本假设 : ①除渗透性外 , 沥青混凝土是均质的 , 完全饱和的理想弹性材料 ; ②沥青混凝土的变形是微小的 ; ③沥青混凝土和孔隙水均不可压缩即只有变形 , 而无体积变化 ; ④孔隙水渗流服从达西定律 , 渗透系数为常数 , 即不随时间、空间变化 , 且水流的惯性力不计 .

因此 , 可以将行车荷载下的沥青路面看成为单圆垂直均布荷载作用下的均质、各向同性、层间完全连续接触的线性弹性层状轴对称体系 . 研究对象是处于饱水状态的新建沥青混凝土路面 , 即路面孔隙都处于饱水状态 , 而不考虑存在不饱和和孔隙的情况 . 假定沥青路面各层均匀压实 , 各部分平均孔隙率相等 , 不存在某个局部孔隙率过大的情况 , 所以可不考虑孔隙的实际分布状态 , 将路面各层的孔隙率视为均匀分布 . 仅考虑小变形情形 ,

不考虑路面逐步压实、孔隙变小的过程,同时也不考虑孔隙水的冻融循环影响,即不考虑温度变化导致的孔隙水压力变化。

本文没有考虑路面结构存在非饱和孔隙等一系列情况,因此由以上模型计算所的结果应该是偏于不利情况的,也就是说本文所分析得到的结果是沥青路面处于最不利条件下沥青路面的水损害情况。

1.2 损伤分析

考虑计算的结构中某一单元,设其出现了一定的损伤。通过损伤前后材料弹性模量的变化来定义损伤度 D , $D = 1 - E/E_0$ 。这说明材料没有损伤时 $D = 0$,破坏时 $D = 1$,故 D 的取值范围为 $D \leq 1$ 。

直接采用各向同性线弹性损伤本构方程式,有

$$\sigma = E(1 - D)\epsilon.$$
$$\sigma_e = \sqrt{3/2 S_{ij} S_{ij}}.$$

式中: s_{ij} 为应力偏量分量, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_{rs} \sigma_{rs}$ 。

疲劳损伤演化方程形式为

$$\frac{dD}{dN} = \alpha^* \left(\frac{\sigma_e}{1 - D} \right)^p (1 - D)^{-q}.$$

式中: α^* , p , q 为材料疲劳损伤特性参数。

2 有限元程序设计

设路面结构内没有初始应力和初始应变,路面结构在轴对称垂直圆形均布荷载作用下的有限元计算图式如图 1 所示。

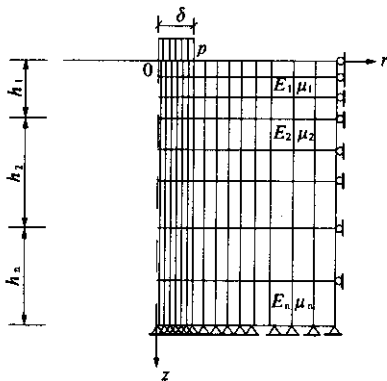


图 1 路面有限元分析模型

Fig.1 FEM model of road surface

选取矩形 8 结点等参单元,经空间和时间离散后,得出有限元方程为

$$\begin{bmatrix} K_e & K_{ep} \\ K_{ep}^T & -\beta \Delta t K_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta R \\ \Delta R_w \end{Bmatrix}.$$

式中: $\{\Delta \delta\}$, $\{\Delta p\}$ 为计算域在某计算时段的结点位移增量列阵和孔隙水压力增量列阵; $\{\Delta R\}$ 为某计算时段荷载增量所对应的结点力增量列阵;

$\{\Delta R_w\}$ 为某计算时刻孔隙水压力所对应的结点力增量列阵; $[K_e]$ 为计算域在某计算时段对应于结点位移的总刚度矩阵; $[K_{ep}]$ 为计算域在某时段对应于孔隙水压力的总刚度矩阵; $[K_p]$ 为渗透流量矩阵。

根据上式,编制有限元程序,进行有限元计算。具体的计算流程为:

(1) 令 $D_0^{(0)}(0) = 0$, 计算无损伤时的位移、孔隙水压力、应变与应力场,并以 $u_{i0}^{(0)}$, $p_{i0}^{(0)}$, $\epsilon_{ij0}^{(0)}$ 与 $\sigma_{ij0}^{(0)}$ 表示,根据其结果确定最危险点。

① 将渗流分析基本方程进行离散,计算各单元的固结矩阵和等效节点荷载及流量增量列阵中的全部元素,按对号入座的方式组装刚度矩阵,得出含所有节点未知量的线性方程组;② 引入位移边界条件,孔压边界条件;③ 引入荷载边界条件,令 $p(t) = 0.1 \sin(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{nt}{T})$,即采用正弦加载方式, n 为荷载分级加载次数,分五次逐级加载,荷载最大值即为标准轮压 0.7 MPa; T 为荷载总作用时间, $T = \delta/v$,其中 δ 为荷载当量圆半径, v 为车速, $t = T/n$,为每一次荷载加载时间;④ 用高斯法求解线性方程组,进而得出各节点的孔隙水压力,位移,应变,应力及等效应力;⑤ 根据等效应力的结果确定最危险点。

(2) 分析裂纹形成过程中的损伤场,并预估裂纹形成寿命。

(3) 分析裂纹扩展过程中的损伤场,并预估裂纹扩展寿命。

3 有限元计算结果分析

3.1 路结构比较方案

为了进行分析比较,本文选用了 4 种路面结构比较方案,以第一种方案为基准方案,在它的基础上依次变换面层厚度、面层渗透系数以及车辆行驶速度。路面上作用的单圆均布荷载当量圆半径为 150 mm,轮压为 0.7 MPa。

方案二在方案一的基础上,将面层厚度变为 12 cm,其余参数相同。方案三在方案一的基础上,将面层的渗透系数变为 2.77×10^{-2} ,其余参数相同。方案一至三车辆行驶速度均取 120 km/h。方案四所取的路面结构其结构厚度,材料参数等与方案一完全相同,只是车辆行驶速度取 30 km/h。

注:以上方案路面结构行车方向约取 6 m,材料参数均取自《公路沥青路面设计规范》(JTJ014-97)。沥青混凝土的渗透系数值 5.03×10^{-4} 取自文

献 1【密集配） 2.77×10^{-2} 取自文献 2【排水性沥青路面混合料），水泥稳定碎石的渗透系数值取自文献 3】，级配碎石和土基的渗透系数取自文献 [4]。

沥青混凝土面层的疲劳损伤特性参数取至文献 5】，半刚性基层的疲劳损伤特性参数根据《公路沥青路面设计规范》（JTJ014 - 97）所推荐的疲劳方程，由文献 5 推荐的方法计算得出。

3.2 路面结构内的孔隙水压力

通过有限元计算，得到无损时四种方案沥青面层局部孔隙水压力等值线，见图 2。

表 1 沥青路面结构一尺寸及参数

Tab.1 The dimension and parameter of the asphalt pavement configuration one

分析层位	材料	层厚 /m	弹性模量 /MPa	泊松比	渗透系数 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	沥青混凝土	0.18	1 800	0.25	5.03×10^{-4}
2	水泥稳定碎石	0.20	1 500	0.25	$2.619 \times 10_{-2}$
3	水泥稳定碎石	0.20	1 200	0.25	2.619×10^{-2}
4	级配碎石	0.20	350	0.25	5×10^{-3}
5	土基	9.0	35	0.35	10^{-8}

表 2 疲劳损伤特性参数
Tab.2 Fatigue idiocratic parameter

结构层	α^*	P	q
沥青混凝土	3.519×10^{-5}	3.24	0
半刚性基层	174.7	14.344	0

不难看出，各图中最大孔隙水压力的值发生在荷载作用区域下方的面层内，这个区域孔隙水压力值的变化也最大，相对于荷载作用位置由近及远，孔隙水压力的值逐渐减小，最小值发生在远离荷载作用区的面层上方。随着深度的增加，孔隙水压力的值不断变小，说明了孔隙水压的产生是由于进入面层内的孔隙水在瞬时高速的车辆荷载作用下，因为路面的弹性变形而形成的。在车载消失后还会形成短暂的负压，使孔隙水回流。这样的反复流动，会对路面结构产生一个附加的作用力。

4 种方案中，孔隙水压力值最大的是方案二，达到了 5.12 kPa。说明相同的结构组成及交通荷载条件下，面层厚度越小，沥青路面结构内产生的孔隙水压力越大，由此造成的水损害就会越大。

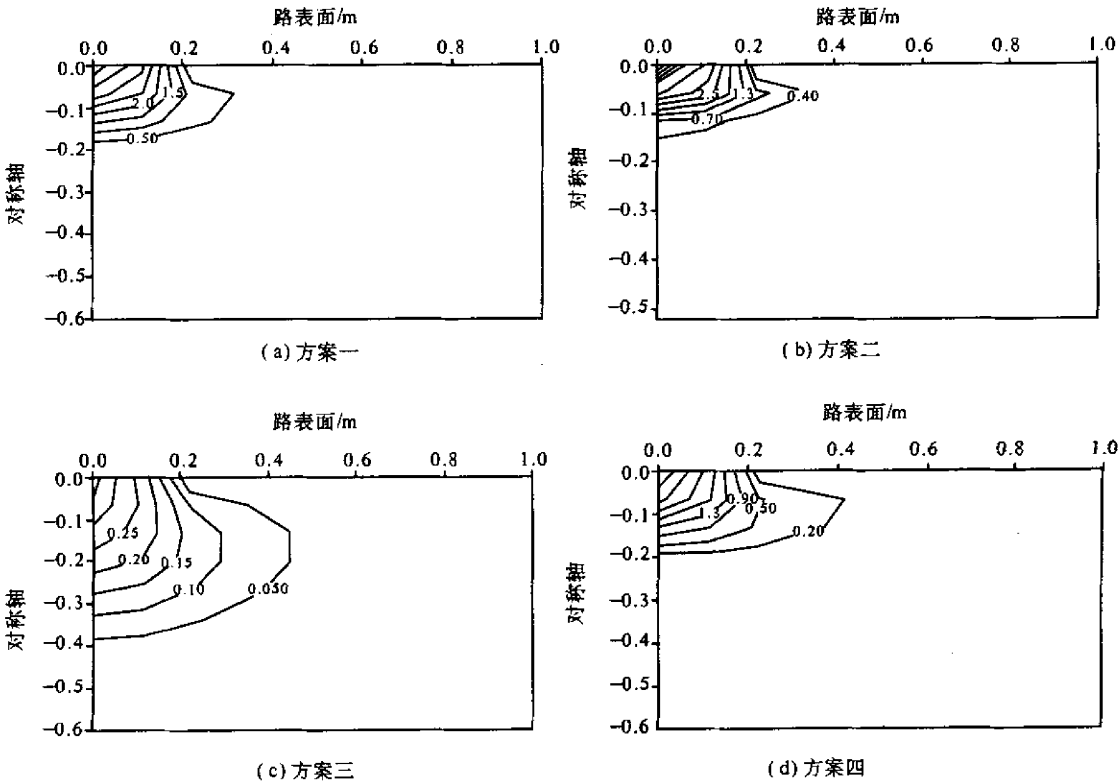


图 2 无损状态下沥青面层内孔隙水压力等值线图(kPa)

Fig.2 Isoline figure of pore water pressure inside asphalt layer undamaged

图 2(c) 面层内的孔隙水压力等值线明显变得稀疏, 最大值急剧变小, 只有 0.37 kPa. 这说明孔隙水压力对渗透系数非常敏感, 会随渗透系数的增大而变小. 换句话说, 沥青路面的渗透性影响着孔隙水压力的分布, 渗透性越大, 孔隙率也就越大, 路面结构层中的水从孔隙中迅速排走, 孔隙水压力也随之变小, 由此产生的水损害就会越小. 反

之就越大.

图 2(d) 中孔隙水压力等值线的变化较缓, 最大值(2.97 kPa)相对于方案一(4.33 kPa)小, 这主要是因为行车速度较慢, 荷载作用时间相对较长, 孔隙中的水有充分时间流出来, 因而降低了孔隙水压力的值.

从图 3(a)~(c) 可以看到, 路面开裂后, 这几

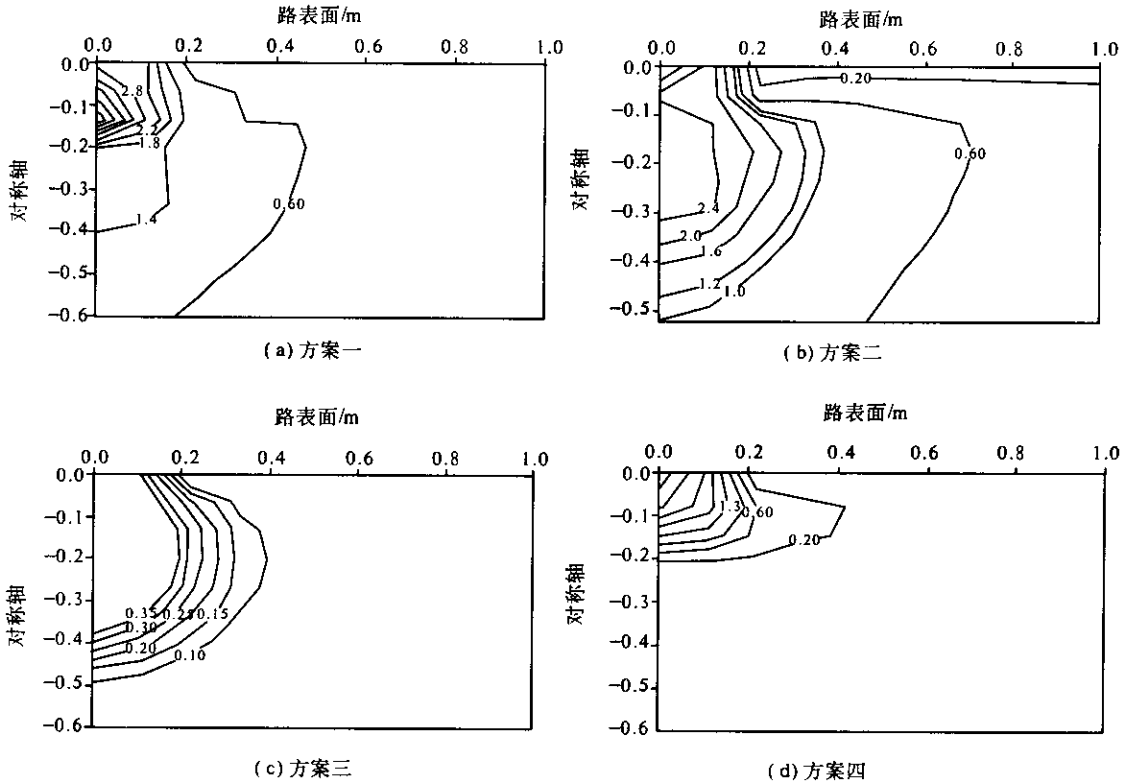


图 3 破坏后沥青面层内孔隙水压力等值线图(kPa)

Fig.3 Isoline figure of pore water pressure inside asphalt layer damaged(kPa)

种方案的孔压分布发生了明显的变化, 孔隙水压力等值线都比无损时的稀疏, 孔压集中在荷载作用边缘, 与损伤开裂带的位置相仿, 最大值也随之降低了. 这主要是由于面层开裂后, 孔隙率明显增大, 增加了孔隙水排出路面的路径, 从而降低了孔隙水压的值. 还来不及排出路面的孔隙水, 则逐渐汇聚在已经形成的裂缝中, 使得这个部位的孔隙水压急剧变化, 在荷载作用下, 使得裂缝持续扩展, 破坏面积增大.

另外, 由图 3(d), 我们发现, 尽管孔隙水压力值有所降低, 但分布与无损时相比, 等值线在面层内的变化不大. 这说明车速对孔压有着极大的影响. 车速快, 荷载作用时间短, 孔隙水在瞬时得到一个压力作用, 迅速产生附加应力, 促使沥青路面受力状态发生改变.

3.3 路表弯沉

在沥青路面设计、使用过程中人们一般重视

路面弯沉, 路面弯沉是路面在垂直荷载作用下产生的垂直位移, 是由路面各结构层各自变形的综合结果, 因此对位移的分析, 主要就是分析路表弯沉的大小.

由有限元计算得, 各种方案下路表最大弯沉值为: 方案一为 0.312 mm, 方案二为 0.347 mm, 方案三为 0.313 mm, 方案四为 0.313 mm. 由此结果可知, 在本文所建立的力学模型下, ①随着面层厚度及面层材料抗压回弹模量的增加, 路表弯沉逐渐降低; ②渗透系数的变化对于路表弯沉没有太大影响, 不管是沥青面层还是半刚性基层的渗透性增大还是减小, 都不会造成弯沉值的变化; ③弯沉对于车速快慢变化不敏感.

总的看来, 沥青路面的水损害与路面的整体承载能力没有直接关系, 而主要表现为局部破坏. 孔隙水的存在使得面层结构的某些部位裂缝扩展加速, 如荷载作用边缘.

3.4 应力和等效应力

通过有限元计算可知:在荷载作用边缘,面层靠近路表的部位每种应力都在急剧变化,此处应力集中的现象是十分明显的.路面开裂以后,大大改变了路面结构内部各种应力状态.除竖向应力外,各种应力的值都明显降低,应力集中的位置也

有所改变,充分说明了沥青面层应力的波动变化与其损伤有关.

图 4 为有限元计算得到的无损状态下沥青面层局部等效应力等值线图.

从图中可以看到,等效应力最大值均位于荷载作用区域下方的区域内,应力最小值位于远离

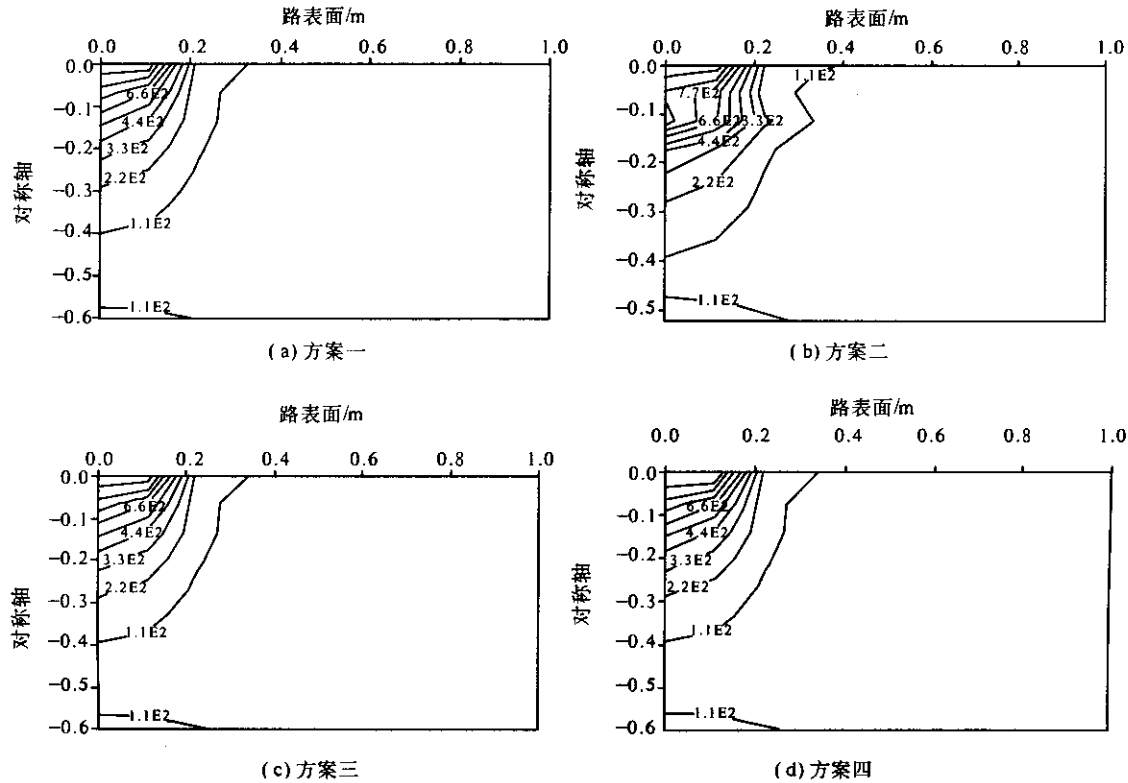


图 4 无损时沥青面层局部等效应力等值线图(kPa)

Fig.4 Isoline figure of equivalent stress of asphalt layer undamaged(kPa)

荷载作用区域的面层上方.应力分布总的趋势是按相对于荷载作用位置距离的远近从小到大,应力较大的区域位于车轮荷载作用的下方,其最大值与面层厚度和面层的弹性模量有关,随面层厚度的减小和材料弹性模量增大而增大,就这一点来说与孔隙水压力的分布趋势有相似之处.但渗透系数及车速的变化对等效应力没有太大的影响,这一点与孔隙水压力分布趋势有区别.

在损伤开始和发展阶段,等效应力的值基本上没有发生太大的变化

从图 5 则可以清楚地看到,路面结构破坏之后,等效应力的分布发生了急剧变化.方案一的等效应力集中于荷载作用区域下方的沥青面层内,在上基层与下基层之间也有一个集中区.方案二的等效应力集中在荷载作用区下的各结构层,形成一个带状区域,其值在沿深度方向直至上基层底部逐渐衰减,然后在下基层突然增大,再沿深度

方向递减.主要是因为方案二面层厚度较薄,荷载来不及扩散传递,在面层内造成了很大的应力集中.方案三的等效应力在面层于基层间形成了一个 s 型的带状集中域.而方案四的等效应力分布则比较均匀,变化不明显.

3.5 损伤度

损伤度 D 在结构内部的分布(损伤场)能真实地反映结构内部空洞、裂缝等缺陷的萌生、发展过程.图 6 至 9 分别为 4 种沥青路面结构比较方案其面层内损伤场变化图.

在孔隙水存在条件下,沥青路面结构在交通荷载作用下,可能在不同位置出现内部裂缝并随时沿不同方向扩展.为尽可能地再现沥青面层裂缝的发展过程,本文在程序计算中并没有规定裂缝发展方向,而是根据任意点的损伤度值是否达到 1.0 而定.

从损伤场图可以看到,由于沥青路面上基层

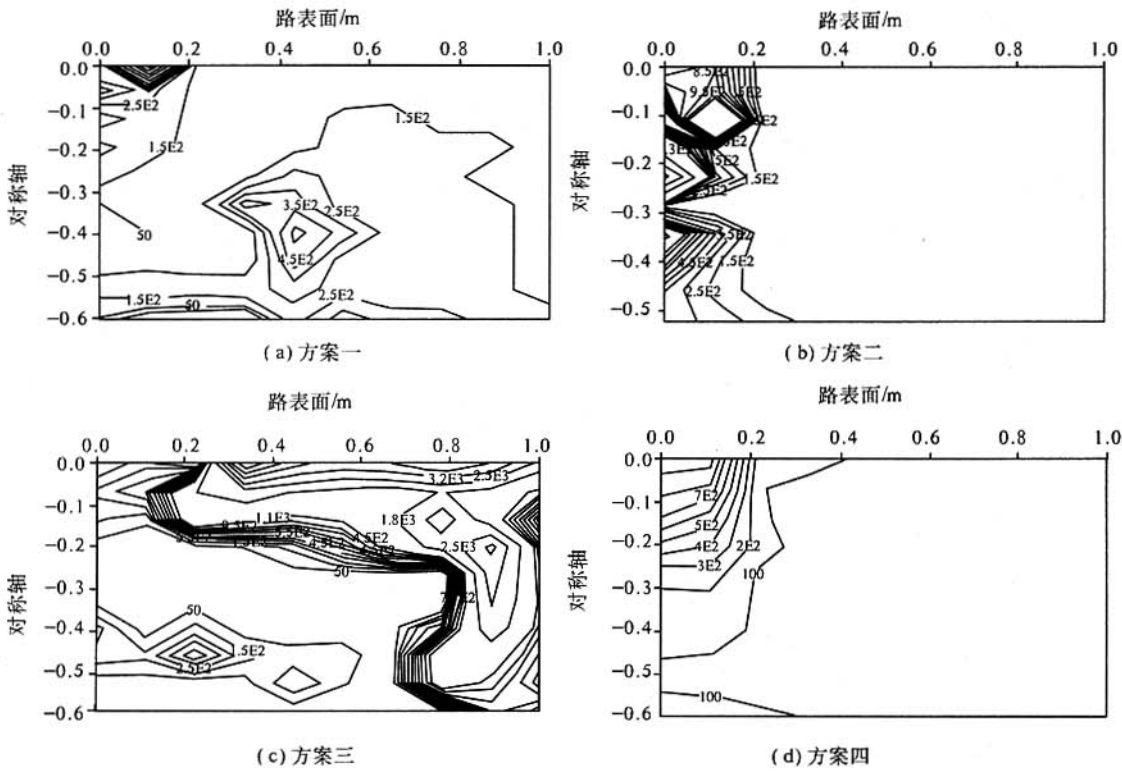


图 5 路面破坏时沥青面层局部等效应力等值线图(kPa)

Fig.5 Isoline figure of equivalent stress of asphalt layer damaged(kPa)

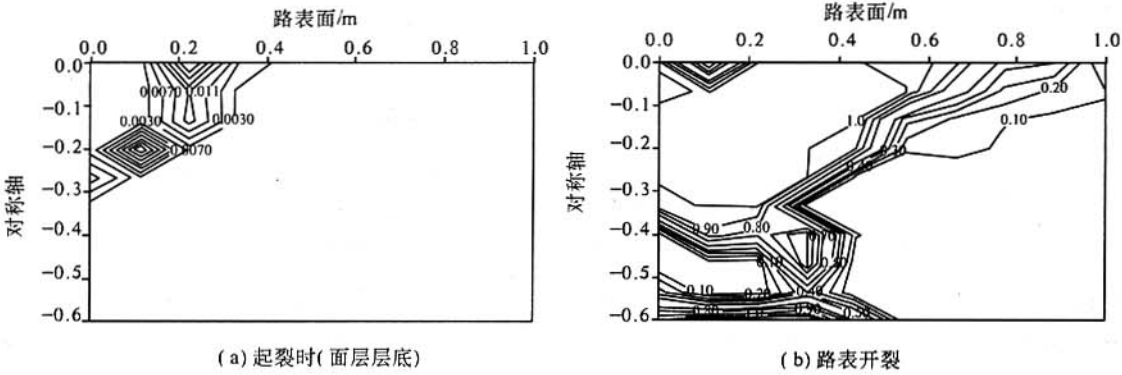


图 6 沥青路面结构内损伤场的变化(方案一)

Fig.6 The changes take place in the damage field of asphalt pavement(configuration one)

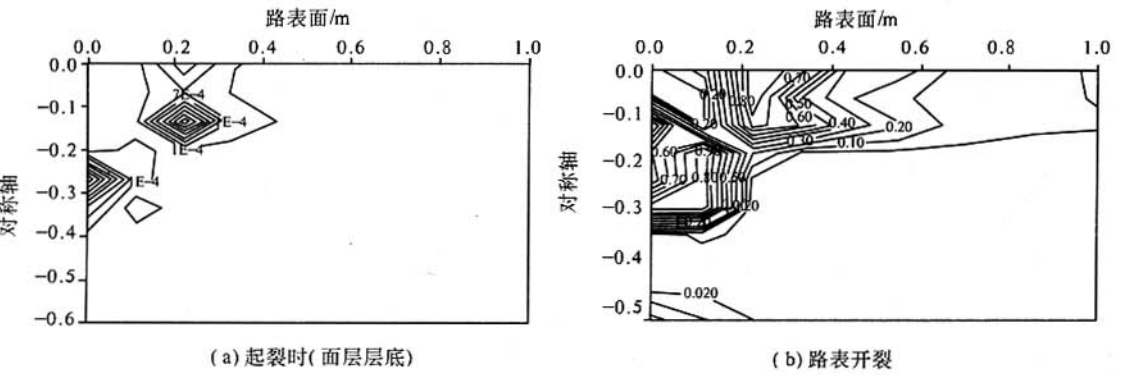


图 7 沥青路面结构内损伤场的变化(方案二)

Fig.7 The changes take place in the damage field of asphalt pavement(configuration two)

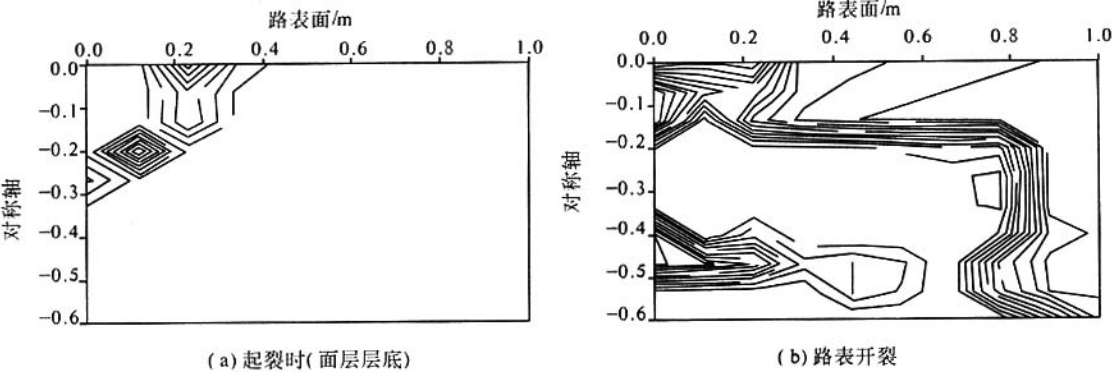


图 8 沥青路面结构内损伤场的变化(方案三)

Fig.8 The changes take place in the damage field of asphalt pavement(configuration three)

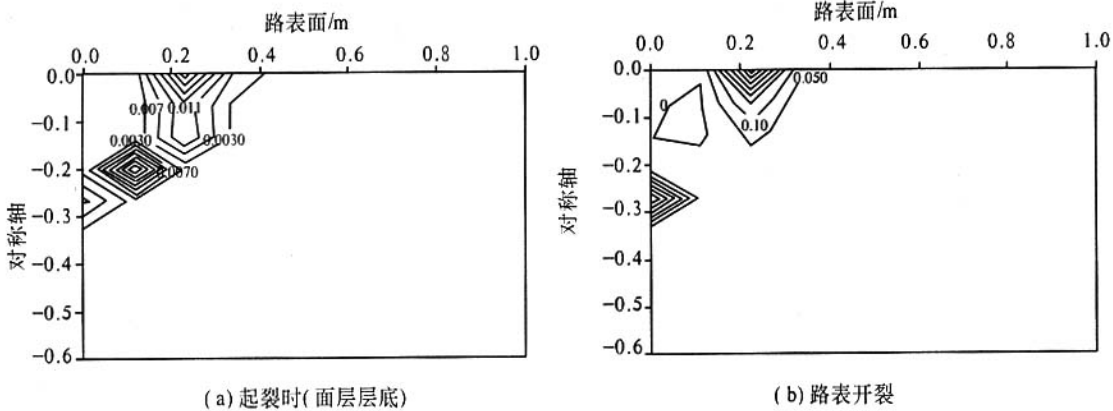


图 9 沥青路面结构内损伤场的变化(方案四)

Fig.9 The changes take place in the damage field of asphalt pavement(configuration four)

或面层底部及荷载作用边缘的应力集中,首先在这些区域萌发损伤,导致裂缝的起裂.然后损伤破坏区逐渐扩展,形成宏观裂缝,贯穿路面结构.就本文所完成的计算,对于孔隙水存在前提下,沥青路面开裂问题,其问题起因是孔隙水压力的存在会造成沥青面层应力集中,荷载的反复作用必然极易造成路面结构疲劳开裂破坏,形成一条具有一定宽度的损伤破坏带.

有限元结果表明,方案二、三、四在车辆荷载的作用下,沥青路面首先从上层底部出现裂缝,在荷载作用下,逐渐向上发展.紧接着路表荷载作用边缘萌发裂缝,逐渐向面层内部扩展.然后下基层内也逐步开裂,裂缝不断扩展,损伤区不断扩大,最终形成宏观的裂缝贯穿路面.方案一,裂缝首先在面层底部发生,紧接着在路表也出现开裂,然后向基层内部扩展,最终贯穿路面.

与其他三种方案相比,路面开裂后方案四的损伤区域最小,说明了随着车速的提高,荷载作用时间缩短,对路面的影响范围反而大.反之,影响范围就小.

方案二的损伤区域主要集中在面层和荷载作用范围内的基层部分,这主要是由于面层厚度较

薄,沥青路面在荷载的作用下迅速破坏.

3.6 疲劳寿命

通过表 3 所列各种方案疲劳寿命的对比,可以得出:

(1)在相同的行车速度(加载频率)下,增大沥青混凝土面层厚度,能有效地延长其疲劳寿命.主要是因为随着面层厚度的增大,在交通荷载作用下产生的应力相对越小,所处的应力水平点就随之降低,疲劳损伤就越小,疲劳寿命也就越长.

表 3 路面结构疲劳寿命 N_f (次)

Tab.3 Fatigue longevity of asphalt pavement N_f						
方案	1	2	3	4	5	6
N_f	0.54	0.24	0.45	0.27	0.25	0.22
	$\times 10^7$	$\times 10^7$	$\times 10^7$	$\times 10^7$	$\times 10^7$	$\times 10^7$

(2)若结构组成及结构层厚度相同,车速(加载频率)越大,疲劳寿命越长.反之,疲劳寿命越短.主要是因为交通荷载作用下,路面响应时间随车速的提高而变短,对路面上一确定位置而言,可减少载荷的作用时间,从而减小路面的损伤程度,增加其疲劳寿命.反之,随着车速的减慢,荷载作用时间延长,使得裂缝有充分时间扩展,因而也就缩短了路面结构的疲劳寿命.

4 结论

笔者首次以比奥固结渗流理论和各向同性线弹性损伤理论及疲劳损伤理论为基础,提出沥青路面的水损害力学分析模型,使用 FOTRAN 语言编写了基于渗流理论和疲劳损伤力学的非线性有限元程序,对沥青路面在孔隙水压力和交通荷载作用下的破坏过程进行了数值模拟.分析结果表明:

(1) 饱水沥青面层内,荷载作用范围内孔隙水压力值变化较大,最大值也发生在这个区域,相对于荷载作用位置由近及远,孔隙水压力的值逐渐减小.随着深度的增加,孔隙水压力的值不断变小.沥青路面的渗透性对孔隙水压力有决定性的影响.渗透性越大,孔隙水压力越小.反之,越大.

(2) 在荷载作用边缘,面层靠近路表的部位应力集中现象十分明显.路面开裂以后,大大改变了路面结构内部各种应力状态.除竖向应力外,各种应力的值都明显降低,应力集中的位置也有所改变.充分说明了沥青面层应力的波动变化与其损伤有关.

(3) 根据本文计算结果,对于孔隙水存在前提

下,沥青路面开裂问题,其问题起因是孔隙水压力的存在会造成沥青面层应力集中,荷载的反复作用必然极易造成路面结构疲劳开裂破坏,形成一条具有一定宽度的损伤破坏带,从而加速路表病害的出现.在这种条件下,沥青路面过早破坏也就不足为奇了.

参考文献:

- [1] 陈荣生,俞建荣,唐蓓华.高速公路沥青路面水损害分析及防治措施[J].江苏交通工程,1999,86:122~129.
- [2] 黄勇生,项新里.排水沥青路面混合料试验研究[J].国外公路,2001,21(1):42~47.
- [3] 张鹏飞,朱立国,谢洪斌,等.水泥稳定碎石排水基层试验路铺筑与检测分析[J].华东公路,1998,114(5):23~26.
- [4] 洪毓康.土质学与土力学[M].北京:人民交通出版社,1999.1~10.
- [5] 周志刚.交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究[D].长沙:中南大学,2003.1~27,103.
- [6] 周振红,宋宇伟,郭恒亮,等. Visual Fortran 基于 Win32 DLL 的混合编程技术[J].郑州:郑州大学学报(工学版),2003.10~13.

The Numerical Simulation Analysis of Asphalt Pavement Moisture Damage Fatigue Failure Process

FU Bo-feng¹, ZHOU Zhi-gang², CHEN Xiao-hong¹, LV Gui-bin³

(1. School of Transportation Engineering of Tongji University, Shanghai 200000, China; 2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 3. Shandong Luqiao Group Co. Ltd, Jinan 250000, China)

Abstract: This paper first puts forward the mechanics analysis model of water damage of the asphalt pavement, which is based on Biot concretion seepage theory and isotropy linear elastic damage theory and fatigue damage theory, use axis symmetry finite element method to solve this problem and produce a finite element program to simulate it numerically. The paper emphatically analyzes the influence which pore water pressure take to asphalt pavement under stress and the fatigue damage process under the existing of the pore water and under the action of traffic load. Calculation results indicate, pore water pressure in the inner asphalt pavement nearly has close relative to permeate coefficient of surface, thickness of surface and wheel speed etc. When the pore of pavement is full of water, under the action of load, the existence of the pore water can cause that stress concentration pricks up. Under the iterative function of load, it causes the pavement fatigue cracking, and accelerates the appearing of breakage of pavement.

Key words: asphalt pavement; moisture damage; pore water pressure; fatigue damage; FEM