

# 不同荷载模式作用下饱水沥青路面结构 动力响应对比分析

周志刚<sup>1</sup>,李岩<sup>1</sup>,俞文生<sup>1,2</sup>,平高明<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室,湖南长沙 410004;  
2. 江西省高速公路投资股份有限公司,江西南昌 330000)

**摘要** 目的 探讨不同荷载模式下饱水沥青路面结构的水损害机理,改进和完善沥青路面防排水设计方法. 方法 基于沥青混合料的渗透试验和多孔介质流固耦合理论,采用非线性有限元方法,对比分析了碗形分布荷载和均布荷载作用下饱水沥青路面结构各力学场量的变化并进行数值模拟分析. 结果 在均布荷载和碗型荷载两载模式下,饱水沥青路面结构内部各力学场量的时程变化特性相类似,均随着车轮动荷载的作用过程表现出波动性和滞后性,孔隙水压力对体积应力和应变影响较大.与均布荷载下计算结果相比,碗形分布荷载作用时上面层内最大孔隙水压力高0.18倍,下面层底部最大水平拉应力和最大水平拉应变分别高0.14倍和0.15倍,中面层底部最大竖向压应力和基层底部最大竖向拉应力分别高0.23倍和0.03倍,路表最大竖向位移高0.07倍,面层内最大剪应力高0.05倍. 结论 在碗形分布荷载作用下,饱水沥青路面更容易产生水损害.采用接近于实际车轮荷载的碗形分布荷载模式来开展饱水沥青路面动力响应分析更为合理.

**关键词** 沥青路面;荷载模式;动力响应;流固耦合效应;非线性有限元方法

中图分类号 TU997;U416.2 文献标志码 A

## Contrastive Analysis of Dynamic Response of Saturated Asphalt Pavement Structure under Different Loading Modes

ZHOU Zhigang<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, YU Wensheng<sup>1,2</sup>, PING Gaoming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material, Ministry of Transport of PRC, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, 410004; 2. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co. Ltd., Nanchang, China, 330000)

**Abstract:** The mechanism of water damage of saturated asphalt pavement structure under different

收稿日期:2018-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51378084);交通运输部应用基础研究项目(2014319825060);湖南省研究生科研创新项目(CX2014B371);道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙)开放基金项目(kfj150303)

作者简介:周志刚(1966—),男,教授,博士,主要从事道路工程方面研究.

loading modes was discussed to improve and perfect the design method of waterproofing and drainage for asphalt pavement. Based on the permeability test of asphalt mixture, the changes of the mechanical field parameters among the saturated asphalt pavement structure under uniform distribution load and bowl-shaped distribution load were simulated and analyzed by using non-linear finite element method according to the theory of porous media. Stimulating results show that the change rules of the mechanical field parameters among the saturated asphalt pavement structure under bowl-shaped distribution load are similar to those under uniform distribution load, and mechanical field parameters of asphalt pavement structures show fluctuation and hysteresis with vehicle load under both loading modes, pore water pressure has a significant impact on volume stress and volume strain. Compared with the calculating results which is under uniform distribution load, the calculating results under bowl-shaped distribution load show the positive pore pressure peak in pavement surface course is 0.18 times higher, and the peaks of horizontal tensile stress and tensile strain at the bottom of the following layer are 0.14 and 0.15 times higher respectively, and the peaks of vertical tensile stress at the bottom of intermediate courses of asphalt pavement and the peaks of vertical tensile stress at the bottom of the basement are 0.23 and 0.03 times higher respectively, the peaks of vertical displacement on the surface of asphalt pavement is 0.07 times higher, the peaks of shearing stress in surface course is 0.05 times higher. So, the water damage take place more easily under bowl-shaped distribution load. It is more reasonable to analyze the liquid-solid coupling effect for saturated asphalt pavement structure by using bowl-shaped distribution load.

**Key words:** asphalt pavement; loading modes; dynamical response; liquid-solid coupling effect; nonlinear finite element method

沥青路面的早期破坏与水的作用密切相关。水-荷载耦合作用下产生的冲刷、泵吸及挤压作用,对路面结构的破坏比干燥状态下高出40倍以上<sup>[1]</sup>。目前对沥青路面水-荷载流固耦合效应的相关研究<sup>[2-14]</sup>,计算分析时所采用的荷载模式均为圆形均布荷载。文献<sup>[15]</sup>指出,由于圆形均布荷载在轮迹作用范围内是一成不变的,在等效圆边缘处荷载分布形式由均布荷载突然变化为零,即在荷载作用半径处,荷载值的左极限与右极限不相等,造成荷载作用不连续,发生突变,这种突变使得该处的某些理论计算结果和实际物理现象不符。另外,现有饱水沥青路面水损害有限元理论分析采用的渗透参数多是参考相关规范标准或其他学者的数据,缺少真实的渗流参数,这决定了理论计算结果与真实情况存在偏差。碗形分布荷载考虑了轮载作用边缘处荷载作用不连续的问题,可避免圆形均布荷载在荷载边缘的荷载集度的突变导致的

面层力学场量的奇异性,更接近于实际车轮荷载。在渗透试验基础上,分别采用均布荷载和碗形分布荷载,开展饱水沥青路面力学响应分析,对比分析两种荷载模式下沥青路面机构内各力学场量的变化,以得到更为合理的荷载模式,为进一步阐释沥青路面水损害机理,改进和完善沥青路面防排水设计方法提供依据。

## 1 沥青混合料渗透试验

笔者利用自研的多场耦合条件下路面材料渗透性测试系统<sup>[16]</sup>,针对AC-13、AC-20沥青混合料进行常水头渗透试验。AC-13的粗集料为玄武岩,细集料为石灰岩;AC-20的粗集料为砂岩,细集料为石灰岩;矿粉均为泰和欣泰建材厂矿粉。沥青选用厦门华特集团提供的I-D等级的SBS改性沥青。通过马歇尔试验确定AC-13、AC-20的最佳油石比分别为4.7%、4.1%。原材料

和沥青混合料各项性能指标均符《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的要求。

由于沥青路面施工压实程度不足、空隙率偏大时易发生水损害,因此,通过控制马歇尔击实次数,分别成型空隙率约为6%和8%的AC-13、AC-20沥青混合料圆柱体试件。在试验温度15℃时的渗透试验结果表明,较低水力梯度下水力梯度与流速呈现为线性关系,按达西定律进行回归。

$$v = kJ. \quad (1)$$

式中: $v$ 为流速,即单位时间单位面积通过的水量,m/s; $k$ 为渗透系数,m/s; $J$ 为水力梯度。

回归参数及精度如表1所示。

表1 回归的 $k$

Table 1 The value of  $k$  obtained by regression

沥青混合料类型	空隙率/%	$k/10^{-5}(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$R^2$
AC-13	6	1.51	0.957 0
	8	8.68	0.981 5
AC-20	6	4.57	0.979 2
	8	23.8	0.969 9

## 2 结构计算模型

### 2.1 有限元模型

沥青路面结构采用我国高等级公路沥青路面常用的典型结构形式,上面层材料为AC-13,中面层为AC-20,下面层为ATB-25。计算结构模型宽为3 m,高为3 m。采用八结点轴对称四边形单元、双向二次位移、双向线性孔隙压力来离散本模型。路面结构和计算分析点如图1所示。假设沥青路面结构层与层之间的接触为完全连续,每层结构均为固-液两相,且液相不可压缩。作用圆形分布垂直荷载,无水平荷载,模型表面除荷载区域之外设为自由面,对称轴和模型外侧面均为竖向自由,横向固定,底部水平和竖向均固定。除了轮载接触表面为不透水边界,其他边界均为透水边界。饱水沥青路面结构分析模

型及计算点如图1所示。图1中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 为半正弦车轮荷载中心线与路面结构各层的交点, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 为车轮荷载边缘与路面结构各层的交点。

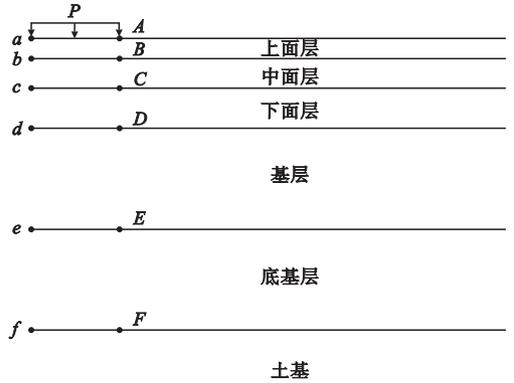


图1 饱水沥青路面结构分析模型及计算点

Fig. 1 The calculating points and model of the asphalt pavement structure under saturation condition

### 2.2 荷载模型

笔者采用圆形均布荷载和碗形分布荷载两类模型。圆形均布荷载为沥青路面设计规范和大多数研究人员所采用。碗形分布荷载表达式为<sup>[15]</sup>

$$p_r = \begin{cases} \frac{m+1}{m} p \left[ 1 - \left( \frac{r}{\delta} \right)^{2m} \right], & r < \delta; \\ 0, & r > \delta. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p$ 为圆形均布荷载作用值; $\delta$ 为荷载作用当量圆半径; $r$ 为计算点至荷载中心距离; $m$ 一般取正整数,介于2~20,对于不同的 $m$ 值,碗形分布荷载作用形状大致相同。当 $m$ 趋近于无穷大时,碗形分布荷载分布形式变为均布荷载,取 $m=4$ 。

荷载与时间的关系式为<sup>[17]</sup>

$$p_r = \begin{cases} p_{\max} \sin \left| \frac{\pi t}{T} \right|, & 0 \leq t \leq T; \\ 0, & T \leq t \leq T_a. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t$ 为荷载作用时刻; $T$ 为荷载作用时长; $p_{\max}$ 为荷载作用全程中的最大荷载值。

在两种荷载作用模式下, $t$ 时刻, $T$ 荷载作用时长,其值与车辆行驶速度和轮载作用

当量圆半径  $\delta$  有关<sup>[18]</sup>. 一般认为, 当轮载和计算点的距离超过  $6\delta$  时, 轮载对计算点的力学响应没有影响, 所以荷载作用时间  $T = 12\delta/v$ , 其中  $v$  为车速,  $m/s$ .  $p_{\max}$  为荷载作用全程中的最大荷载值, 对于圆形均布荷载, 按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中规定的标准轴载 BZZ-100 予以考虑,  $p_{\max} = 0.7 \text{ MPa}$ ; 对于碗形分布荷载, 根据式(1), 按  $p = 0.7 \text{ MPa}$ ,  $p_{\max} = 0.7 \text{ MPa} \times 5/4 = 0.875 \text{ MPa}$ . 荷载当量圆半径  $\delta = 0.302/2 = 0.151 \text{ m}$ . 计算时采用的行车时速

为  $100 \text{ km/h}$ , 则对应的荷载作用时长  $T$  为  $0.046 \text{ s}$ .

### 2.3 结构计算参数

沥青路面各结构层厚度及力学参数按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)取值(见表2). 其中 AC-13 和 AC-20 的渗透系数取空隙率 6% 对应的试验结果. 由于 ATB-25 的渗透性强于 AC-20, 其渗透系数参照 AC-20 的空隙率 8% 试件的渗透试验结果取值<sup>[19]</sup>.

表2 典型路面结构组成参数

Table 2 The component parameters of asphalt pavement structure

结构层位	厚度/ cm	弹性模量/ MPa	泊松比	水密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ )	渗透系数/ $10^{-5}(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
上面层	4	2 000	0.3	1 000	1.51
中面层	6	1 800	0.3	1 000	4.57
下面层	8	1 800	0.3	1 000	23.8
基层	20	1 500	0.3	1 000	1.0
底基层	20	1 500	0.3	1 000	4.5
土基	242	40	0.4	1 000	0.001

## 3 不同荷载模式下路面结构力学场量的响应分析

非线性有限元分析结果表明, 两种荷载模式下, 饱和沥青路面结构内各个力学场量的时程变化过程中一般在荷载作用时刻  $0.023 \text{ s}$  产生最大值. 因此, 笔者将分别对比分析各个力学场量的时程变化和荷载作用时

刻  $0.023 \text{ s}$  时的空间分布规律.

### 3.1 孔隙水压力

不同荷载模式作用下, 饱和沥青路面各计算点孔隙水压力的时程曲线如图2所示, 在  $0.023 \text{ s}$  时沥青路面内孔隙水压力等值线分布如图3所示, 在  $0.023 \text{ s}$  时沥青路面结构不同层位孔隙水压力水平分布曲线如图4所示.

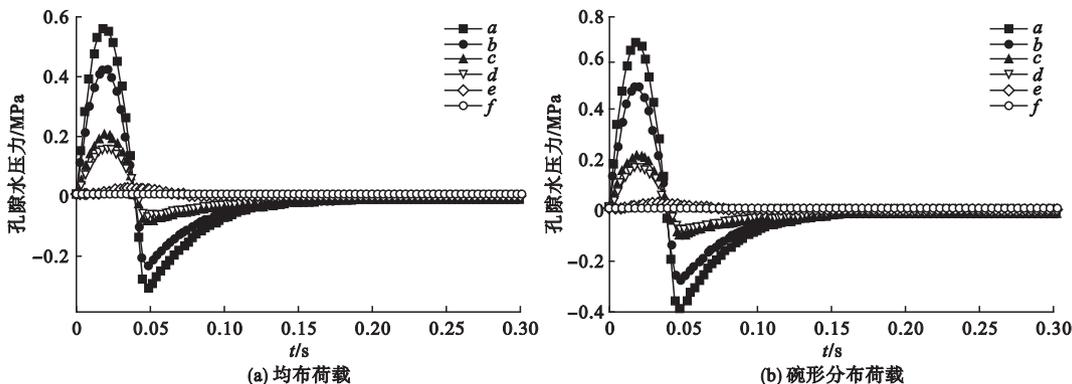


图2 不同荷载模式下各计算点孔隙水压力时程曲线

Fig. 2 The time-history curves of pore water pressure of calculate points under different loading modes

从图2可知,圆形均布荷载和碗形分布荷载模式下各计算点的孔隙水压力时程变化曲线非常相似,这归因于所采用的线弹性理论和达西线性渗流理论.在半正弦动荷载作用下,饱水沥青路面结构内孔隙水压力随着时间的历程表现出一定的波动性.在加载前

半段, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 点的孔隙水压力随荷载的增大而不断增大, $a$ 点的增加速率最大,在时程为0.023 s时,表面层 $a$ 点的孔隙水压力达到最大值.在加载的后半段, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 点的孔隙水压力迅速减小.

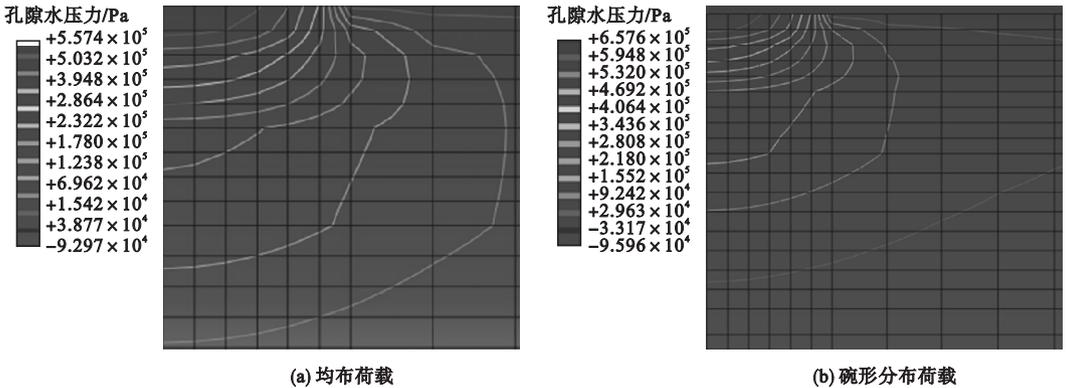


图3 0.023 s时沥青路面内孔隙水压力等值线

Fig. 3 The contour lines of pore water pressure in asphalt pavement at 0.023 s

但两种荷载模式下的孔隙水压力时程变化的幅度存在差异.在 $t=0.023$  s时,均布荷载和碗形分布荷载在 $a$ 点产生的最大正孔隙水压力分别为557.4 kPa和657.6 kPa,碗形荷载在 $a$ 点产生的最大正孔隙水压力值是均布荷载在 $a$ 点产生的最大孔隙水压力值的1.18倍,这与碗形分布荷载在荷载中心处较为集中有关.因此,在碗形分布荷载作用下,饱水沥青路面结构内出现的正负向孔隙水压力形成的冲刷和泵吸效应比均布荷载作用下的要强,进而对路面结构水损害作用更大.

从图3可以看出,荷载作用时刻0.023 s时,均布荷载和碗形分布荷载作用下,路面结构内孔隙水压力主要集中在面层和基层内部,为正孔隙水压力,沿路面结构深度孔隙水压力逐渐减小.荷载区域内孔隙水压力为正,较深处和荷载区域外的孔隙水压力为负或很小,正孔隙水压力远高于负孔隙水压力,最大正孔隙水压力位于荷载下路表面.但由于荷载模式的不同,在荷载作用圆边缘处内外孔隙水压力变化梯度存在差异.圆形均布荷载

下孔隙水压力变化梯度较大.图4所示的沥青路面结构不同层位孔隙水压力水平分布曲线表现得更为清晰.图4中 $(-\delta, 0)$ 为荷载中心位置, $\delta$ 为荷载当量圆半径, $(0, 0)$ 处为荷载作用圆边缘.

由图4可以看出,两种荷载模式作用下,在作用时刻0.023 s时,各结构层位的孔隙水压力水平分布相类似,均在荷载边缘内外都产生了波动,其中上面层顶部、上面层底部、中面层底部及下面层底部的波动性较大,其余层位变化较小.对于其他力学场量,也有类似的变化规律.不同之处在于,均布荷载作用下,上面层顶部、上下中面层底部各层位孔隙水压力从距荷载边缘内 $\delta/6$ 处至荷载边缘的变化幅值,与孔隙水压力从荷载边缘至距荷载边缘外 $\delta/6$ 处的变化幅值的差值均要大于碗形分布荷载作用下对应工况的差值,可见碗形荷载作用下,轮载边缘内外孔隙水压力的变化梯度要小于均布荷载作用下的变化梯度.说明均布荷载作用时,相比碗形荷载作用下,荷载边缘的突变所导致孔隙水压力产生的波动较大.

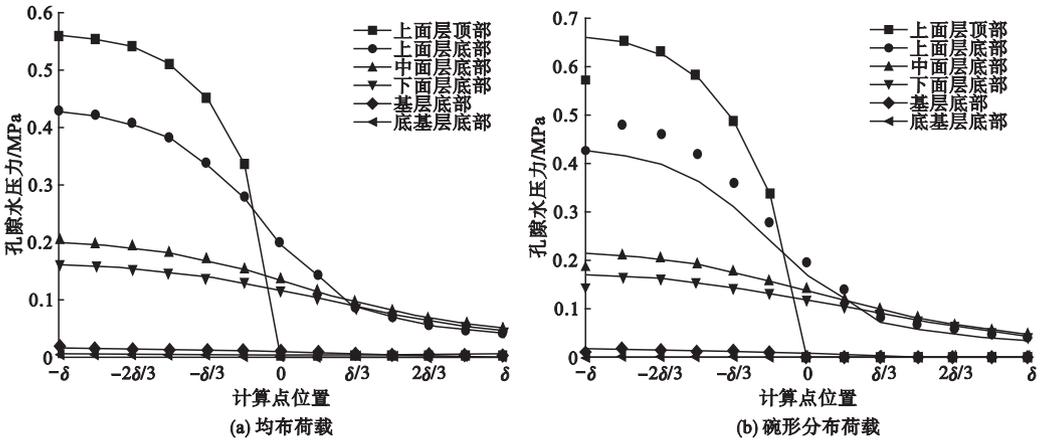


图4 0.023 s时沥青路面结构不同层位孔隙水压力水平分布曲线

Fig. 4 The horizontal distribution of pore water pressure in different position of asphalt pavement structure at 0.023 s

### 3.2 水平应力

不同荷载模式作用下,饱和沥青路面各计算点水平应力的时程曲线如图5所示.在

0.023 s时沥青路面内水平应力等值线分布如图6所示.在0.023 s时沥青路面结构不同层位水平应力水平分布曲线如图7所示.

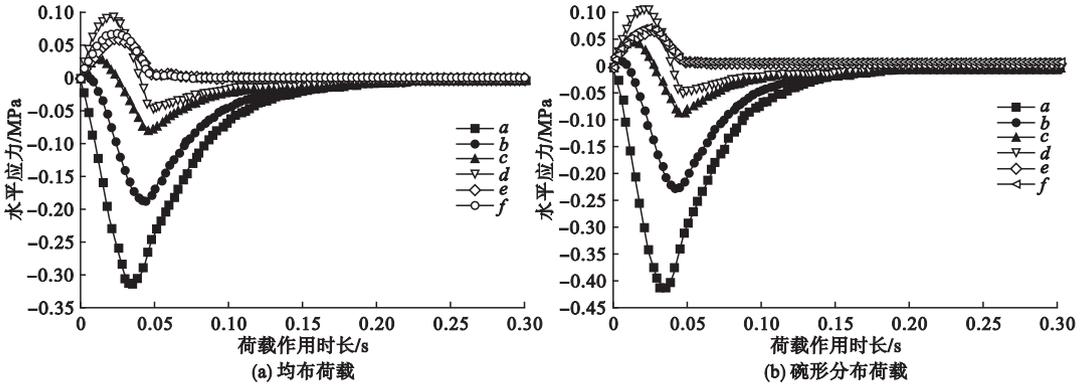
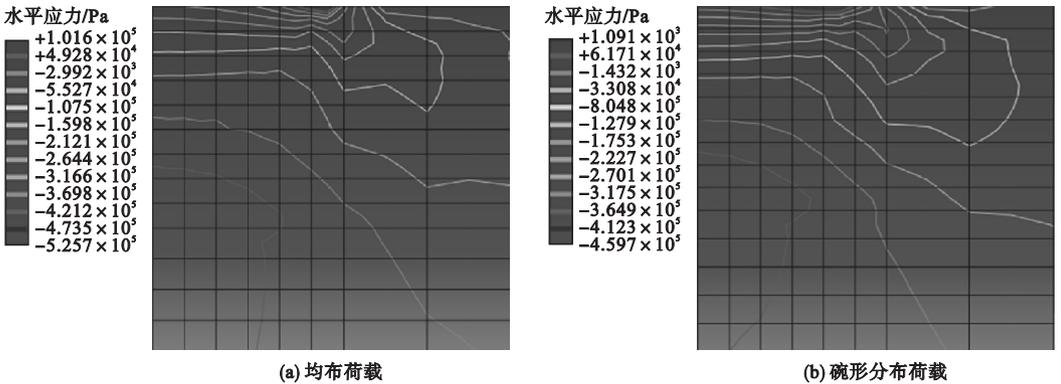


图5 不同荷载模式下各计算点水平应力时程曲线

Fig. 5 The time-history curves of horizontal stress of calculate points under different loading modes



(a) 均布荷载 (b) 碗形分布荷载

图6 0.023 s时沥青路面内水平应力等值线

Fig. 6 The contour lines of horizontal stress in asphalt pavement at 0.023 s

从图5可以看出,两种荷载模式作用下,各计算点的水平应力变化规律相类似,上面层层底  $b$  点会产生轻微的水平拉应力,且拉应力随着时间推移而不断向下发展和增大,下面层底部  $d$  点水平拉应力达到最大,此时  $t=0.023\text{ s}$ ,随后拉应力开始随着深度的增加逐渐减小,基层、底基层都在荷载作用时段出现了拉应力,但相比下面层层底,拉应力较小.由于中下面层、基层和底基层出现不同程度的水平拉应力,在车轮荷载的反复作用下,会使中下面层、基层和底基层出现疲劳破坏,从而使面层底部或半刚性基层层底出现疲劳

裂缝,随后裂缝会进一步反射到面层上,导致面层出现开裂.若这些裂缝不及时修复,就会有水存留在裂缝中,在正负孔隙水压力的“泵吸”作用下,会加剧沥青路面的水损害.由于碗形分布荷载在荷载中心处的集度较大,故下面层底部  $d$  点的最大水平拉应力为  $108.1\text{ kPa}$ ,是均布荷载作用下最大水平拉应力  $94.7\text{ kPa}$  的  $1.14$  倍,在荷载的反复作用下,与均布荷载相比,更易于产生疲劳破坏.

图6表明,由于荷载模式的不同,在荷载作用圆边缘处内外水平应力变化梯度存在差异.圆形均布荷载下水平应力变化梯度较大.

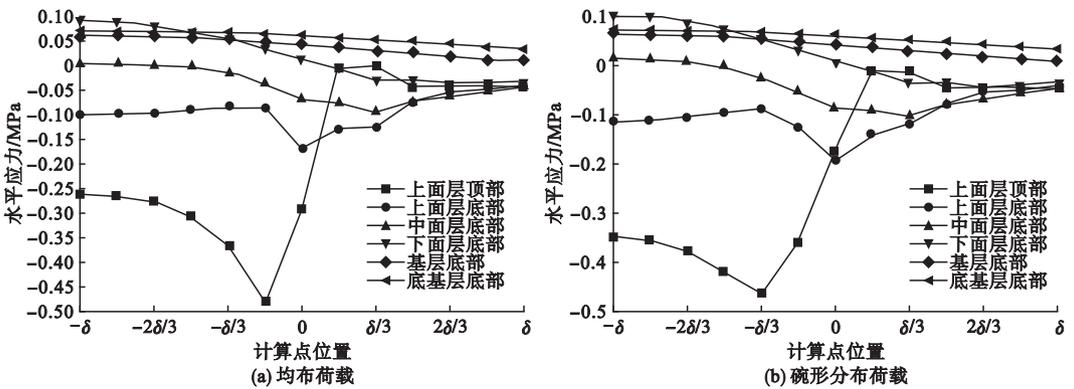


图7 0.023 s时沥青路面结构不同层位水平应力水平分布曲线

Fig. 7 The horizontal distribution of horizontal stress in different position of asphalt pavement structure at 0.023 s

由图7可以看出,均布荷载作用下,上面层顶部、上下中面层底部各层位水平应力从距荷载边缘内  $\delta/6$  处至荷载边缘的变化幅值,与水平应力从荷载边缘至距荷载边缘外  $\delta/6$  处的变化幅值的差值均要大于碗形分布荷载作用下对应工况下水平应力的差值,可见碗形荷载作用下,轮载边缘内外水平应力

的变化梯度要小于均布荷载作用下的变化梯度.说明均布荷载作用时,荷载边缘的突变会导致水平应力产生的波动性更大,特别是上面层表面和底部.

### 3.3 水平应变

不同荷载模式作用下,饱和沥青路面各计算点水平应变的时程曲线如图8所示.在

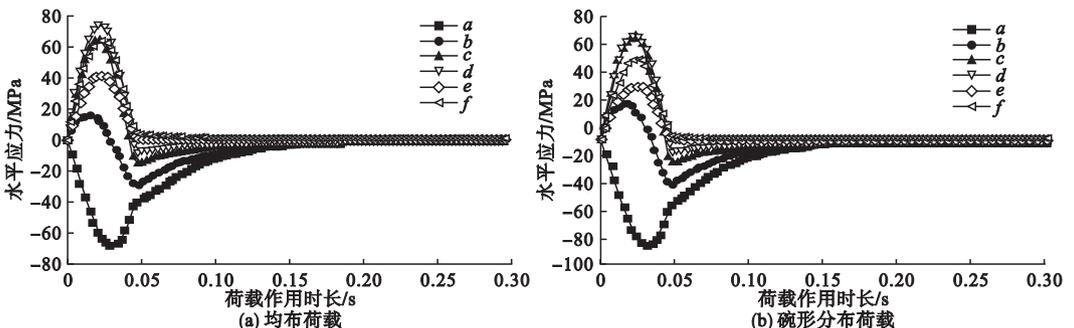


图8 不同荷载模式下各计算点水平应变时程曲线

Fig. 8 The time-history curves of horizontal strain of calculate points under different loading modes

0.023 s 时沥青路面内水平应变等值线分布如图 9 所示. 在 0.023 s 时沥青路面结

构不同层位水平应变水平分布曲线如图 10 所示.

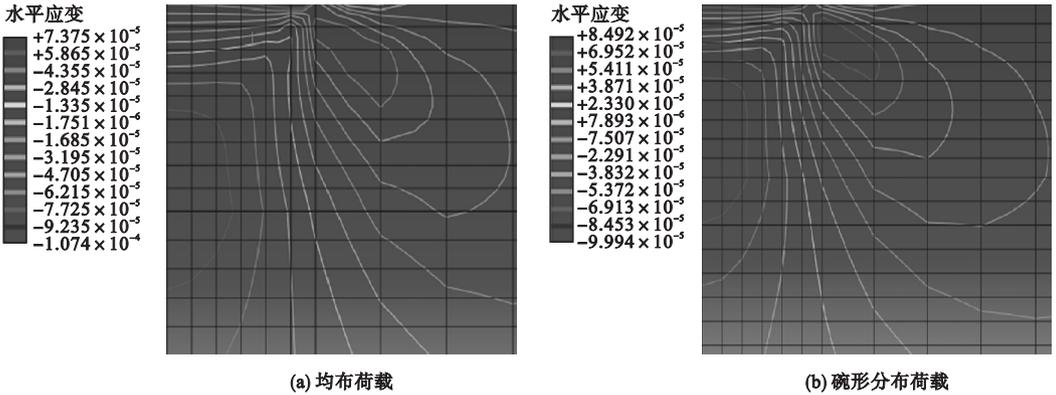


图 9 0.023 s 时沥青路面内水平应变等值线图

Fig. 9 The contour lines of horizontal strain in asphalt pavement at 0.023 s

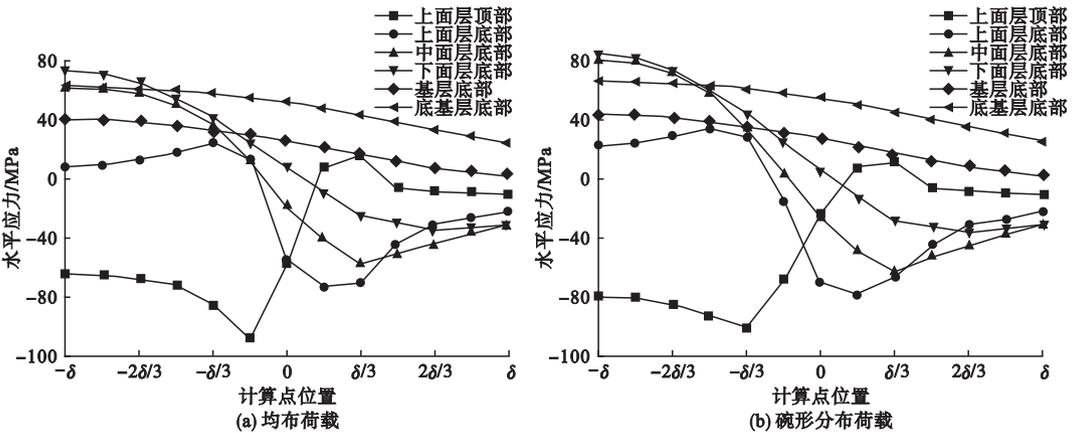


图 10 0.023 s 时沥青路面结构不同层位水平应变水平分布曲线

Fig. 10 The horizontal distribution of horizontal strain in different position of asphalt pavement structure at 0.023 s

从图 8 可看出,两种荷载模式作用下,路面结构内部拉、压应变的变化规律与车轮荷载作用曲线呈现正相关的关系. 在荷载作用前半段,路面结构内部拉、压应变随着荷载的持续增加而增加,在加载后半段,车轮荷载出现峰值时,下面层出现最大拉应变,此时  $t = 0.023$  s,然后在荷载卸载阶段,路面结构内部拉、压应变随着时间的增加而减小. 由于中、下面层存在着较大的拉应变,所以在重复交通荷载作用下,进而会出现裂缝,进而向上发展,导致路表开裂. 在  $t = 0.023$  s 时,碗形分布荷载下在下面层底部产生的最大拉应变为  $84.92 \times 10^{-6}$ ,是均布荷载作用下最大拉应变  $74.64 \times 10^{-6}$  的 1.15 倍. 因此,碗形分布荷载

对路面结构产生的破坏性影响更为严重.

由图 9 可知,由于荷载模式的不同,在荷载作用圆边缘处内外水平应变变化梯度存在差异. 圆形均布荷载下水平应变变化梯度较大.

由图 10 可以看出,均布荷载作用下,上面层顶部、上下中面层底部各层位水平应变从距荷载边缘内  $\delta/6$  处至荷载边缘的变化幅值,与水平应变从荷载边缘至距荷载边缘外  $\delta/6$  处的变化幅值的差值均要大于碗形分布荷载作用下对应工况下水平应变的差值,可见碗形荷载作用下,轮载边缘内外水平应变的变化梯度要小于均布荷载作用下的变化梯度. 说明均布荷载作用时,荷载边缘的突变会

导致水平应变发生较大的波动,特别是上面层的表面和底部.

### 3.4 竖向应力

不同荷载模式作用下,饱和沥青路面各

计算点竖向应力的时程曲线如图 11 所示. 在 0.023 s 时沥青路面内竖向应力等值线分布如图 12 所示. 在 0.023 s 时沥青路面结构不同层位竖向应力水平分布曲线如图 13 所示.

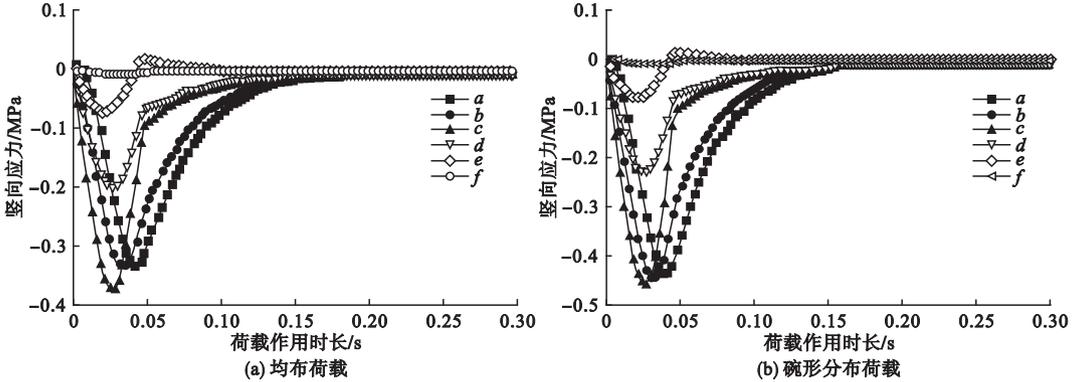


图 11 不同荷载模式下各计算点竖向应力时程曲线

Fig. 11 The time-history curves of vertical stress of calculate points under different loading modes

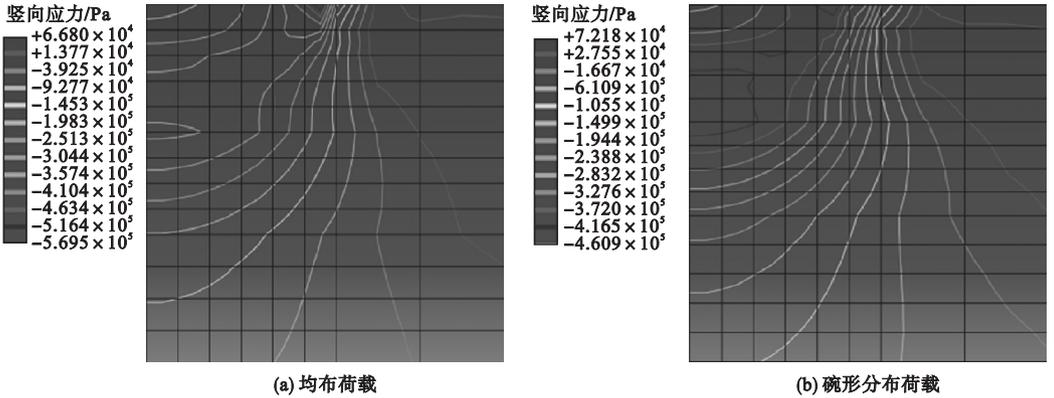


图 12 0.023 s 时沥青路面内竖向应力等值线图

Fig. 12 The contour lines of vertical stress in asphalt pavement at 0.023 s

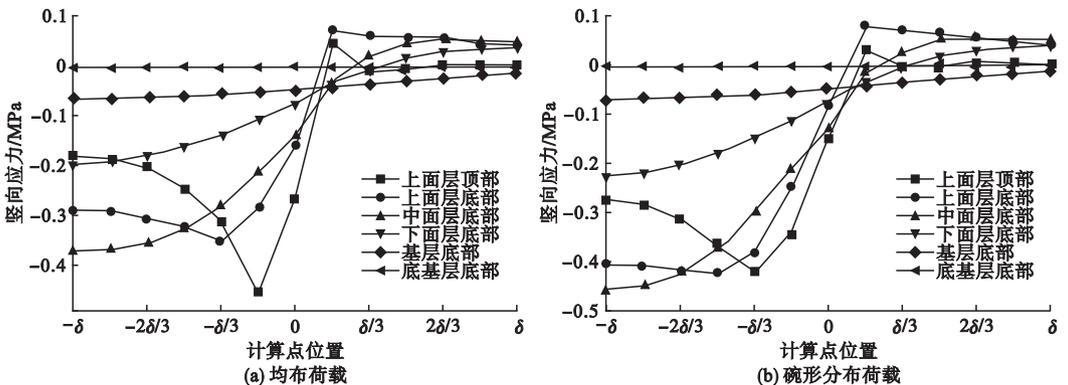


图 13 0.023 s 时沥青路面结构不同层位竖向应力水平分布曲线

Fig. 13 The horizontal distribution of vertical stress in different position of asphalt pavement structure at 0.023 s

由图 11 可知,两种荷载模式作用下,各层位竖向压应力随着时间推移呈现出先增大后减小的趋势,首先是底基层底部出现最大压应力,随着时间推移,沿深度向上各层最大压应力依次呈现,且最大压应力峰值在中面层底部,这与孔隙水压力最初产生于表面而后向下扩散、各层孔隙水压力随时间逐渐消散有关.在时间  $t=0.046\text{ s}$  时,车轮荷载作用消失,此时各计算点的竖向应力不为零,这说明虽然外荷载已经撤掉,但因为路面结构内部此时仍有孔隙水压力没有消散(见图 5),根据有效应力原理,则路面依然存在竖向压应力,并且在基层底部出现了轻微的竖向拉应力,这可能使得此处处在重复荷载作用下产生层间脱粘或集料脱粒.在时间  $t=0.023\text{ s}$  时,碗形分布荷载作用下在中面层底部 c 点的竖向压应力达到最大值  $456.8\text{ kPa}$ ,是均布荷载作用下的最大值  $372.2\text{ kPa}$  的  $1.23$  倍.在时间  $t=0.046\text{ s}$  时,碗形分布荷载作用下在基层底部 e 点的竖向拉应力达到最大值  $18.26\text{ kPa}$ ,是均布荷载作用下最大值  $17.77\text{ kPa}$  的  $1.03$  倍,这使得基层与底基层之间更易脱粘或集料脱粒.

由图 12 可知,由于荷载模式的不同,在

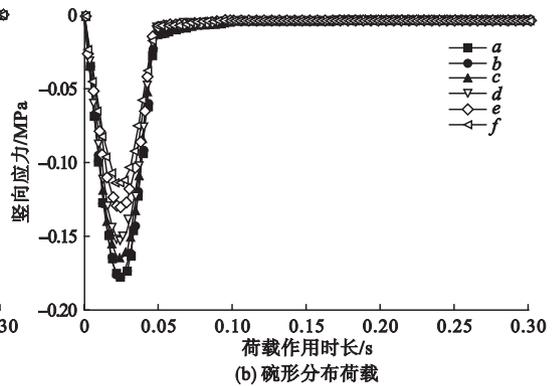
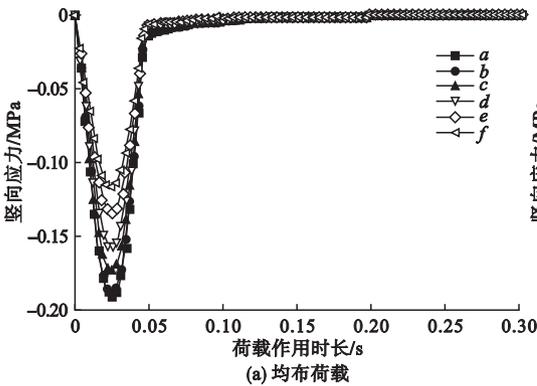


图 14 不同荷载模式下各计算点竖向位移时程曲线

Fig. 14 The time-history curves of vertical displacement of calculate points under different loading modes

由图 14 可知,两种荷载模式作用下,竖向位移沿路面深度方向逐渐减小,并且各点竖向位移随时间的变化均呈半正弦变化规律,在荷载作用时间  $0.023\text{ s}$  时刻,上面层表

荷载作用圆边缘处内外竖向应力变化梯度存在差异.圆形均布荷载下竖向应力变化梯度较大.

由图 13 可以看出,均布荷载作用下,上面层顶部、上下中面层底部各层位竖向应力从距荷载边缘内  $\delta/6$  处至荷载边缘的变化幅值,与竖向应力从荷载边缘至距荷载边缘外  $\delta/6$  处的变化幅值的差值均要大于碗形分布荷载作用下对应工况下竖向应力的差值,可见碗形荷载作用下,轮载边缘内外竖向应力的变化梯度要小于均布荷载作用下的变化梯度.说明均布荷载作用时,荷载边缘的突变所导致竖向应力的波动比碗形分布荷载作用时的要大,特别是上面层顶部和底部.此外,由图 13 还可发现,竖向拉应力不仅产生于对称轴上基层底部,还产生于荷载区域外的路表和面层内部,从而可能导致沥青混合料中集料剥落和面层之间及其与基层之间的层间脱粘.

### 3.5 竖向位移

不同荷载模式作用下,饱和沥青路面各计算点竖向位移的时程曲线如图 14 所示.在  $0.023\text{ s}$  时沥青路面内竖向位移等值线分布如图 15 所示.在  $0.023\text{ s}$  时沥青路面结构不同层位竖向位移水平分布曲线如图 16 所示.

面 a 点的竖向位移达到最大值,在行车荷载结束作用时间时,各计算点的位移接近于零.但各点的时程变化存在区别.对于同一时程,采用 Forchheimer 型非线性渗流定律计算出

的竖向位移均小于采用达西定律的计算值,且达西渗流情形中各点竖向位移在车辆荷载结束一定时间后才逐渐减小为零,而 Forchheimer 型非线性渗流情形中各点竖向位移随车辆荷载结束迅速降为零.这是因为 Forchheimer 型非线性渗流时孔隙水压力较大,沥青混合料骨架承受的竖向力较小,从而位移

也就较小.同时由于 Forchheimer 型非线性渗流的水压力梯度中存在惯性阻力,在车辆荷载结束时,惯性阻力会阻止孔隙水回流,使结构层弹性变形特性较强,变形滞后于荷载的现象不明显,使竖向位移随荷载结束而迅速恢复为0.

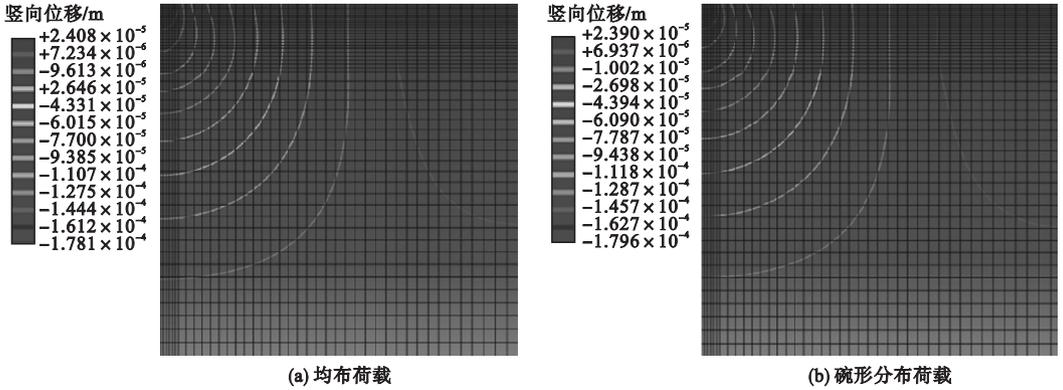


图 15 0.023 s 时沥青路面内竖向应力等值线图

Fig. 15 The contour lines of vertical stress in asphalt pavement at 0.023 s

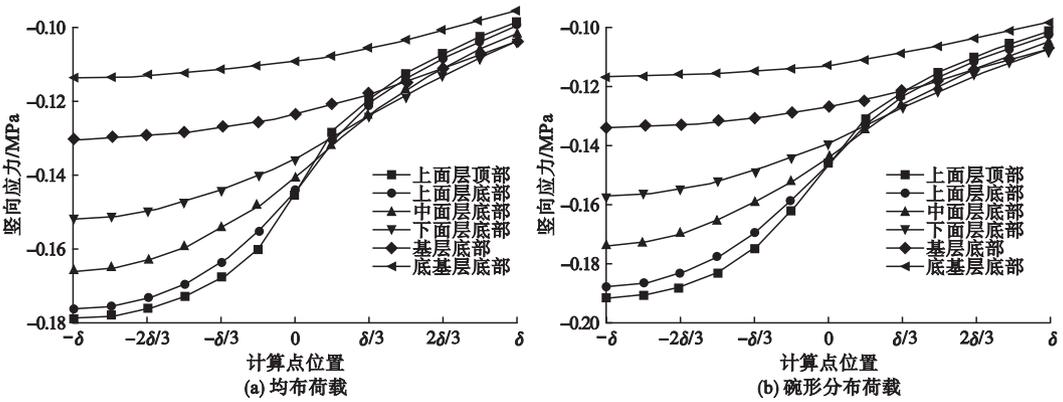


图 16 0.023 s 时沥青路面结构不同层位竖向位移水平分布曲线

Fig. 16 The horizontal distribution of vertical displacement in different position of asphalt pavement structure at 0.023 s

由图 15 可知,由于荷载模式的不同,在荷载作用圆边缘处内外竖向位移变化梯度存在差异.圆形均布荷载下竖向应力变化梯度较大.

由图 16 可以看出,由于荷载模式的不同,在荷载作用圆边缘处内外竖向位移变化梯度存在差异.圆形均布荷载下竖向位移变化梯度较大.均布荷载作用下,上面层顶部、上下中面层底部各层位竖向位移从距荷载边

缘内  $\delta/6$  处至荷载边缘的变化幅值,与竖向位移从荷载边缘至距荷载边缘外  $\delta/6$  处的变化幅值的差值均要大于碗形分布荷载作用下对应工况下竖向位移的差值,可见碗形荷载作用下,轮载边缘内外的竖向位移的变化梯度小于均布荷载作用下的变化梯度.说明均布荷载作用时,荷载边缘的突变会导致竖向位移发生一定的波动,特别是上面层顶部和底部.此外,在荷载区域外,上面层顶不及上

中面层底部的竖向位移小于其下部紧邻的结构层顶面竖向位移,这与其结构层内的竖向受拉有关。

### 3.6 剪应力

不同荷载模式作用下,饱和沥青路面各

计算点剪应力的时程曲线如图 17 所示. 在 0.023 s 时沥青路面内剪应力等值线分布如图 18 所示. 在 0.023 s 时沥青路面结构不同层位剪应力水平分布曲线如图 19 所示.

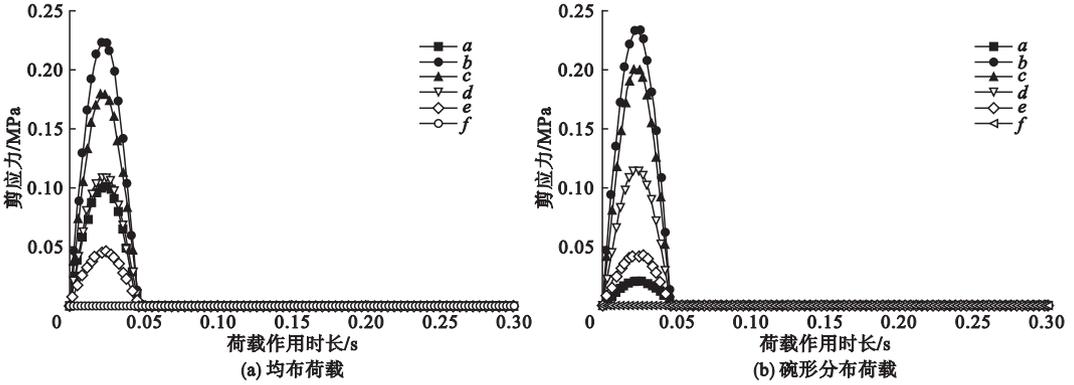


图 17 不同荷载模式下各计算点剪应力时程曲线

Fig. 17 The time-history curves of shearing stress of calculate points under different loading modes

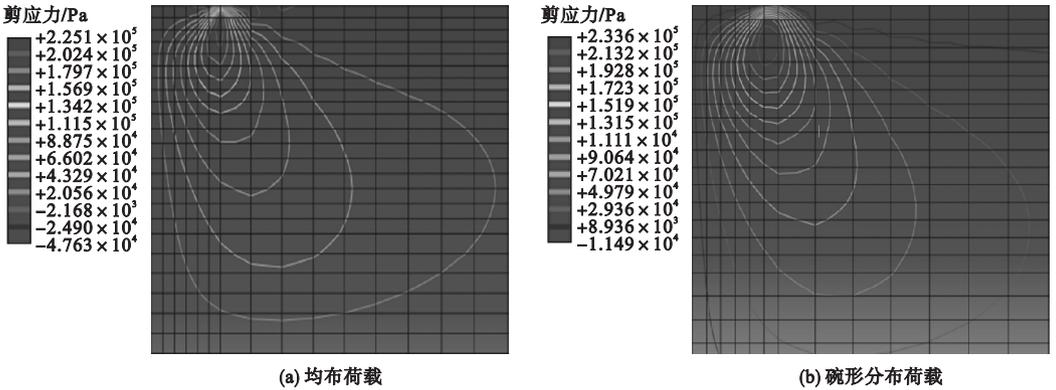


图 18 0.023 s 时沥青路面内剪应力等值线图

Fig. 18 The contour lines of shearing stress in asphalt pavement at 0.023 s

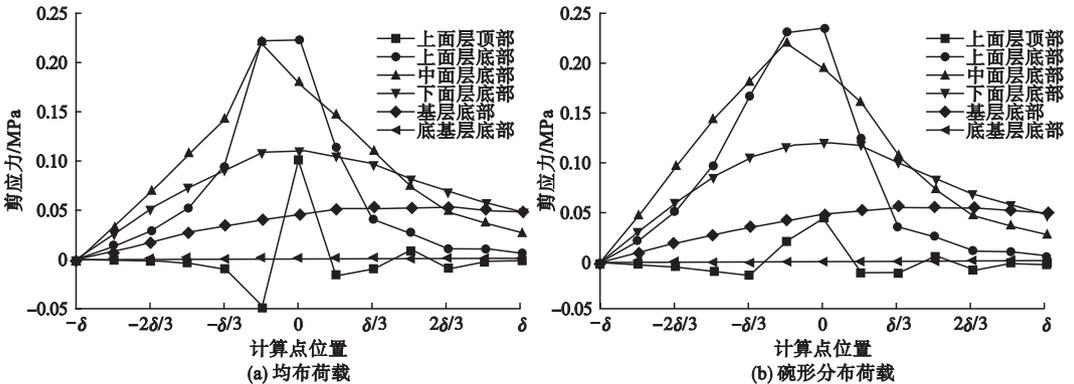


图 19 0.023 s 时沥青路面结构不同层位剪应力水平分布曲线

Fig. 19 The horizontal distribution of shearing stress in different position of asphalt pavement structure at 0.023 s

由图 17 可知,两种荷载模式作用下,荷载边缘下方 A ~ F 点的时程变化曲线跟荷载作用时程曲线类似,呈半正弦变化规律,各点的剪应力随着荷载的增加而增加,随着荷载的减小而减小,在车轮荷载撤去时,各点的剪应力也同时为零.并且,剪应力随着深度的增加呈现出先增加后减小的趋势,在  $t = 0.023$  s 时,各层层的剪应力达到最大值,路面中最大剪应力位于上面层底部,并且碗形分布荷载作用下其值为 233.6 kPa,是均布荷载作用下的最大剪应力 223.2 kPa 的 1.05 倍.

由图 18 可知,两种荷载模式作用下,均是在上面层中下部荷载作用边缘处剪应力等值线分布密集,其形状大致呈椭圆形.剪应力的峰值从表面层开始增加,到表面层底部达到最大值,然后开始逐渐减小,直至底基层层底的剪应力为零.均布荷载作用下剪应力最大值出现的位置为轮载作用边缘外侧上面层层底直至中下面层,而碗形分布荷载作用下剪应力最大值出现的位置为轮载作用边缘下方上面层层底直至中下面层.因此,碗形分布荷载更易导致沥青面层的剪切开裂或剪切滑移.并且应加强沥青面层材料的抗剪切能力,特别是中下面层,以防止沥青面层发生剪切破坏.此外,由于荷载模式的不同,在荷载作用圆边缘处内外剪应力变化梯度存在差异.圆形均布荷载下剪应力变化梯度较大.

由图 19 可知,均布荷载作用下,上面层顶部、上面层底部和中面层底部各层位的剪应力从距荷载边缘内  $\delta/6$  处至荷载边缘的变化幅值,与剪应力从荷载边缘至距荷载边缘外  $\delta/6$  处的变化幅值的差值均要大于碗形分布荷载作用下对应工况下剪应力的差值,说明均布荷载作用时,荷载边缘的突变会导致剪应力产生的波动更大,特别是上面层顶部和底部.

## 4 结 论

(1)碗形分布荷载模式中荷载中心区域

集度较大,其作用下的路面结构各力学场量的峰值均高于均布荷载作用下各力学场量的峰值,对沥青面层造成的水损害程度更大.

(2)圆形均布荷载在荷载圆边缘处存在突变,其荷载圆边缘内外力学场量的变化梯度比碗形分布荷载作用下的要大,各力学场量空间分布规律不同于碗形分布荷载情形,特别是上面层,会导致沥青路面水损害机理分析的误判.

(3)两种荷载模式作用下沥青路面结构内各个力学场量的时程变化规律一致,均呈现出波动性,各力学场量的时程变化随孔隙水压力的变化存在一定的滞后现象,而剪应力的时程变化与荷载作用的时程变化一致.

(4)由于碗形分布荷载模式更接近于实际车轮荷载,因此,采用碗形分布荷载模式来开展饱水沥青路面动力响应分析更为合理.并且,其分析所反映出的沥青路面水损害程度也更为严重.

## 参考文献

- [1] 潘宝峰. 动水压力作用下路面材料损伤的评价方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2010. (PAN Baofeng. Study on the evaluation method of pavement materials damage under hydrodynamic pressure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.)
- [2] 傅搏峰. 沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2005. (FU Bofeng. The numerical simulation analysis of asphalt pavement moisture damage fatigue failure process[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2005.)
- [3] 董泽蛟,谭忆秋,曹丽萍,等. 水-荷载耦合作用下沥青路面孔隙水压力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(10):1614-1617. (DONG Zejiao, TAN Yiqiu, CAO Liping, et al. Research on pore pressure within asphalt pavement under the coupled moisture-loading action[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2007, 39(10): 1614-1617.)
- [4] 崔新壮,金青. 轮载作用下饱水沥青路面的动力响应[J]. 山东大学学报(工学版),2008,38(5):19-24. (CUI Xinzhuang, JIN Qing. The dynamic response of saturated asphalt pavement under wheel loads[J]. Journal of Shandong university (engineering science), 2008, 38(5): 19-24.)
- [5] 周长红,陈静云,王哲人,等. 沥青路面动水压力计算及其影响因素分析[J]. 中南大学学报

- (自然科学版),2008,39(5):1100-1104.  
(ZHOU Changhong, CHEN Jingyun, WANG Zheren, et al. Dynamic numerical solution of pore water pressure and its parameters for asphalt pavement[J]. Journal of central south university (science and technology), 2008, 39(5):1100-1104.)
- [6] 祁文洋,任瑞波,李美玲. 饱和沥青路面内孔隙水压力研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2011,25(3):63-66.  
(QI Wenyang, REN Ruibo, LI Meiling. Research on pore pressure within saturated asphalt pavement[J]. Journal of Shandong university of technology (natural science edition), 2011, 25(3):63-66.)
- [7] 吴国雄,周宇,杨锐. 降雨入渗时沥青路面流固耦合作用的力学响应[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(6):1141-1144.  
(WU Guoxiong, ZHOU Yu, YANG Rui. Mechanical response of asphalt pavement under fluid-solid coupling in the case of rainfall infiltration[J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2012, 31(6):1141-1144.)
- [8] 董泽蛟,曹丽萍,谭忆秋. 饱水沥青路面动力响应的空间分布分析[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(4):79-82.  
(DONG Zejiao, CAO Liping, TAN Yiqiu. Spatial distribution of dynamic response for saturated asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing jianzhu university, 2007, 29(4):79-82.)
- [9] 邓融. 水和荷载耦合作用下沥青路面动力响应研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.  
(DENG Rong. Dynamic response of asphalt pavement subjected to the coupling action of moisture-loading[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2010.)
- [10] 李志刚,邓小勇. 动载作用下沥青路面内部孔隙水压力的轴对称弹性解[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008,38(5):804-810.  
(LI Zhigang, DENG Xiaoyong. Axial symmetric elastic solution of pore water pressure in asphalt pavement under mobile load[J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2008, 38(5):804-810.)
- [11] CUI Xinzhuang, JIN Qing, SHANG Qingsen, et al. Numerical simulation of dynamic pore pressure in asphalt pavement [J]. Journal of southeast university (english edition), 2009, 5(1):63-66.
- [12] 李锬. 沥青混合料抗水损害试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.  
(LI Kun. Experimental study on resistance to moisture damage of asphalt mixture [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2016.)
- [13] 郭成成. 孔隙水压力对沥青路面性能的影响及其监测研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.  
(GUO Chengcheng. The influence of pore pressure on the performance of the asphalt pavement and its monitoring [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2013.)
- [14] 刘富强,滕旭秋. 高温时流固耦合作用对沥青面层畸变能的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(1):87-93.  
(LIU Fuqiang, TENG Xuqiu. Influence of fluid-solid coupling action when high temperature on distortion energy of asphalt pavement layer [J]. Journal of railway science and engineering,2018,15(1):87-93.)
- [15] 王凯. 路面设计的碗形分布荷载图式[J]. 岩土工程学报,1983,5(4):43-55.  
(WANG Kai. The diagram of bowl-shaped distribution load for pavement design[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1983, 5(4):43-55.)
- [16] 周志刚,李岩,李帅帅,等. 多场耦合条件下路面材料渗透性测试系统;ZL 201510212012.5 [P]. 2017-07-21.  
(ZHOU Zhigang, LI Yan, LI Shushuai, et al. The permeability test system for pavement material under multi-field coupling conditions;ZL 201510212012.5 [P]. 2017-07-21.)
- [17] 黄仰兴. 路面分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社,1998.  
(HUANG Yangxian. Pavement analysis and design [M]. Beijing: China Communications Press,1998.)
- [18] 董泽蛟. 多孔介质理论下饱水沥青路面动力响应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.  
(DONG Zejiao. Dynamic response analysis of saturated asphalt pavement based on porous medium theory[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2006.)
- [19] 向浩,朱洪洲,陈柳晓,等. 离析对密级配沥青混合料渗透性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(11):26-34.  
(XIANG Hao, ZHU Hongzhou, CHEN Liuxiao, et al. Effects of segregation on the permeability of the dense-graded asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2018, 37(11):26-34.)