

基于微观结构的沥青碎石封层路面力学行为分析

刘 丽,王宇强,刘 豫

(西安建筑科技大学土木工程学院,西安 710055)

摘 要: 为了认识沥青碎石封层的力学行为与破坏机理,采用有限元软件建立沥青碎石封层微观结构二维有限元模型,分析在竖向荷载作用下封层内部微观结构应力、应变和位移的力学行为特性. 分析结果显示: 轮迹内侧边缘碎石竖向位移最大,偏转角度最小;相反,轮迹外边缘碎石偏转角度最大,并向两侧逐渐递减. 沥青层内的水平应变主要为压应变,轮迹外侧沥青和胶浆层接触面上剪应变最大. 黏结层的水平变形、剪切变形均不同程度大于沥青层,黏结层与胶浆层交界处具有最大等效 Mises 应力,易发生剪切破坏. 胶浆层的中心主要为受压变形,胶浆层两侧边缘处主要表现为较高剪切变形.

关键词: 沥青碎石封层; 微观结构; 数值分析; 力学行为

中图分类号: U 416

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)12-1857-07

doi: 10.11936/bjtxb2016030025

Mechanical Behavior Analysis of Asphalt Chip Seals Based on the Microstructure

LIU Li, WANG Yuqiang, LIU Yu

(Xi'an University of Architecture and Technology, School of Civil Engineering, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the microstructure, a two-dimensional finite element model for asphalt chip seals was built to analyze the mechanical behavior under vertical loads. The results show that the vertical displacement of stones in chip seals at the inner edge of the wheel is the maximum and the rotation angle is the minimum. On the contrary, the rotation angle of the stones at outer edge of the wheel path is the largest, and gradually decreases from the outer edge to two sides. The horizontal strain in asphalt binder is mainly compressive strain. The maximum shear strains at the outer edge of wheel path exist at the interface between asphalt and asphalt mastic. The horizontal deformation and shear deformation at the aggregate-asphalt interface are higher than in asphalt binder. The maximum Mises stress is on the interface at the stone-asphalt and the greater shear deformation is in asphalt mastic under the stones, which easily lead to shear failure on the asphalt chip seals.

Key words: asphalt chip seals; microstructure; numerical analysis; mechanical behavior

目前,我国沥青碎石封层路面设计仍然局限于经验法,仅仅从表象上重视集料的物理指标和级配,并未从本质上认识沥青碎石封层的力学行为与破坏机理,使得设计出的封层材料用量仅仅给出了大致

范围,现场技术人员往往还需根据自身经验确定材料的用量^[1],由此设计出的封层性能变异性较大,与本来设计强度不一致,这种随机强度也决定了沥青碎石封层路面不能使用在较高等级路面的铺筑

收稿日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108375); 陕西省重点学科建设专项资助项目(E01004)

作者简介: 刘 丽(1976—),女,副教授,主要从事道路结构与材料方面的研究, E-mail: liuli-highway@126.com

中,只能用于中、低等级道路交通量路面和道路养护中^[2-3].

2005年张艳华^[4]对封层施工、封层防水、封层与基层的黏结等方面进行了研究. 2008年刘丽^[5]对同步碎石封层的层间剪切进行了相关研究. 2009年李曦^[6]分析了石料类型、粒径大小、沥青类型及用量、动水压力等因素对封层性能的影响. 显然,现有沥青碎石封层的研究多是围绕路用性能展开的试验研究,从微观结构角度研究封层力学行为的资料还很缺乏. 本文以沥青碎石封层微观结构模型为研究对象,分析在竖向荷载作用下封层产生的位移及碎石偏转角度,以及沥青层内、沥青-碎石之间黏结层、沥青-碎石之间胶浆层内的变形,通过研究封层路面的力学行为特征,寻找出封层发生破坏的薄弱位置,进一步深入了解碎石封层路面的破坏机理,为沥青碎石封层的材料设计提供新的思路与参考.

1 沥青碎石封层微观结构模型与相关参数

1.1 有限元模型建立及简化

采用有限元软件建立沥青碎石封层二维微观结构数值模型^[7-8]. 计算模型包含:碎石、沥青、沥青胶浆、基层和土基. 水平方向上,碎石被沥青黏结料包裹,竖直方向上,碎石被沥青胶浆包裹. 沥青胶浆施工过程中,首先在基层表面喷洒一层沥青,然后再撒布一层碎石,喷洒的沥青与基层表面的细粉颗粒会黏结在一起,形成一层薄薄的类似胶浆的黏结物质,该薄层位于碎石颗粒底部,每个碎石颗粒象“坐在”沥青胶浆黏结料中一样. 在本研究中,把这种薄层黏结料看成沥青胶浆,即沥青和细粉形成的混合物,并定义为黏弹性材料^[9]. 简化后的沥青碎石封层微观结构示意图及局部放大详图见图1.

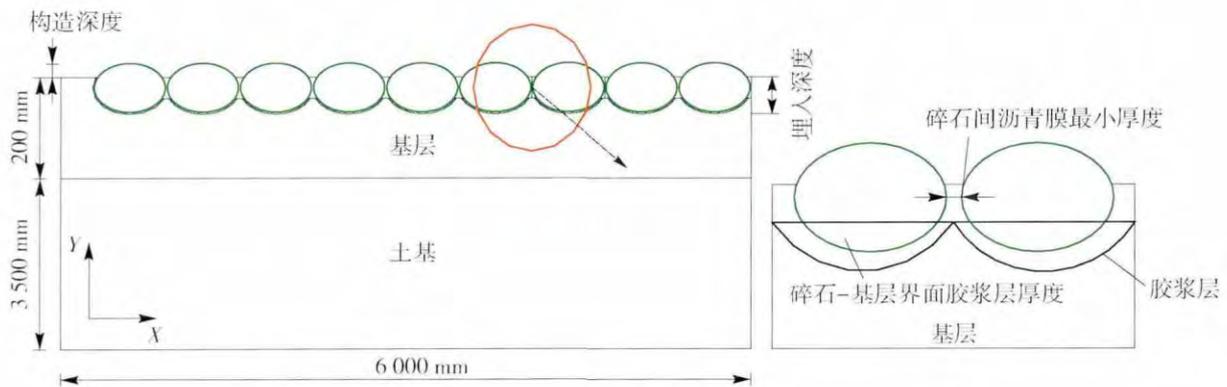


图1 沥青碎石封层微观结构有限元模型示意图

Fig.1 Finite element model of asphalt chip seal microstructure

1.2 材料参数及相关参数

1.2.1 材料参数

本文碎石、基层、土基采用弹性参数,用杨氏模量 E 和泊松比 μ 表征; 沥青及沥青胶浆采用黏弹性参数,用 Burgers 模型表征,并将 Burgers 模型参数转换为 Prony 级数输入到有限元软件中进行计算^[10]. 其中 $E1$ 、 $E2$ 、 $\eta1$ 、 $\eta2$ 为材料在 20 °C 时的黏弹性参数, $g1$ 、 $g2$ 、 $\tau1$ 、 $\tau2$ 为 Prony 级数系数. 各类材料参数及转换结果如表 1~3 所示.

1.2.2 相关参数

本文建立的沥青碎石封层微观结构二维有限元模型的路面几何尺寸如图 1 所示. 参照相关文献及规范^[11-12],考虑实际工程中集料的最大公称尺寸和构造深度,并且最大粒径不超过处治层的厚度,碎石长度和高度分别为 14.9 mm,碎石与碎石间最小距

表1 碎石、基层及土基材料弹性参数

Table 1 Elastic material parameters of stone, base and subgrade

材料	E/MPa	μ
碎石	40 000	0.25
基层	1 300	0.35
土基	40	0.40

表2 沥青及沥青胶浆 Burgers 模型参数

Table 2 Burgers model parameters of asphalt and asphalt mastic

材料类型	$E1/\text{MPa}$	$\eta1/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	$E2/\text{MPa}$	$\eta2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$
沥青	0.625	0.543	0.175	0.011 5
沥青胶浆	1.590	0.920	0.230	0.860 0

离为 1 mm, 沥青与基层界面胶浆层厚度为 1 mm, 路表构造深度为 2.5 mm, 碎石嵌入深度为 2.5 mm.

表 3 沥青及沥青胶浆 Prony 级数转换结果
Table 3 Prony series conversion results of asphalt and asphalt mastic

材料类型	g_1	τ_1	g_2	τ_2
沥青	0.786 6	0.038 4	0.213 4	10.866 3
沥青胶浆	0.960 2	0.725 7	0.039 8	0.039 8

1.3 荷载作用及位移边界条件

1) 根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006) 采用双轮组单轴荷载 BZZ-100, 按照荷载应力静力等效的原则, 将转换后的荷载施加在碎石几何中心上表面, 荷载大小为 96.15 N. 图 2 为荷载总应力转化为单个碎石细观应力的示意图. 图 3 为沥青碎石封层荷载作用示意图, 图中 A、B、C、D 分别为荷载作用范围内, 封层路表轮迹外边缘、轮迹中心、轮迹内边缘、轮隙中心位置.

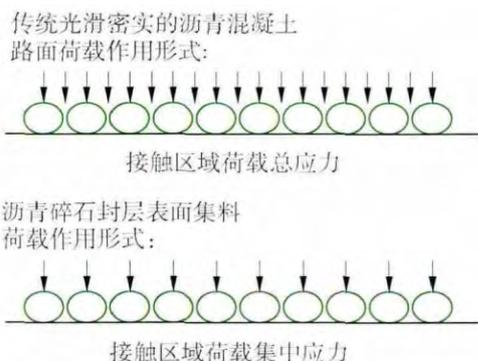


图 2 荷载总应力转化为单个碎石细观应力的示意图
Fig. 2 Schematic of load total stress to microstress

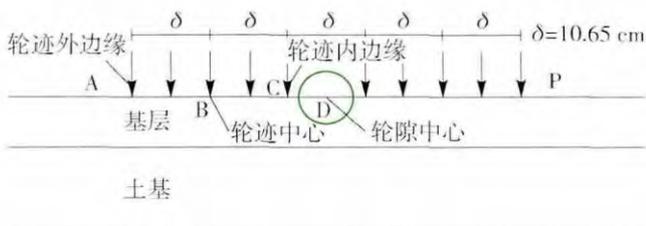


图 3 沥青碎石封层荷载作用示意图
Fig. 3 Load schematic of asphalt chip seal

2) 位移边界条件: 模型底部 X、Y 方向均没有位移, 为完全约束; 模型左侧、右侧边界没有 X 方向的位移.

1.4 网格划分

为更好地反映封层细观结构实际受力和局部

应力状态, 将荷载作用位置处的碎石、沥青层、沥青胶浆层单元进行了密集划分, 尽可能使得计算准确和结果收敛. 单元划分采用以四边形为主的自由进阶算法, 选择四结点双线性平面应变四边形单元, 减缩积分并进行沙漏控制. 封层网格划分如图 4 所示.

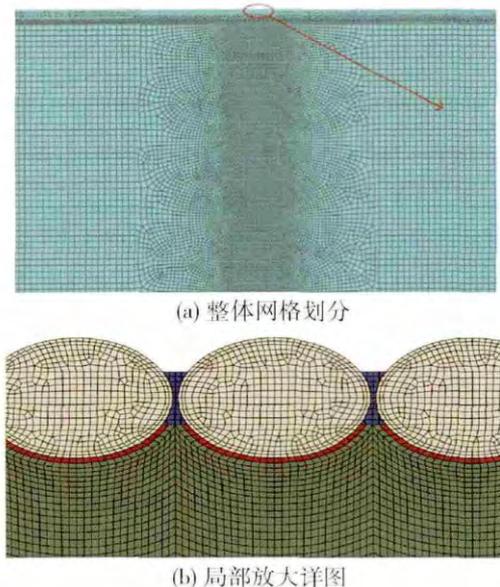


图 4 沥青碎石封层网格划分
Fig. 4 Meshing of asphalt chip seal

2 沥青碎石封层细观结构有限元分析

2.1 封层路表碎石位移及偏转角度变化规律

为研究封层路表碎石变形特征, 在模型中沿封层路表碎石几何中心创建路径, 得到碎石几何中心的竖向位移 (见图 5) 并计算碎石偏转角度 (见图 6). 图 7 为封层路表碎石水平位移. 具体计算及分析结果如下:

由图 5 可知, 模型对称, 荷载对称, 竖向变形也对称. 碎石最大竖向位移由轮迹内边缘向轮隙中心

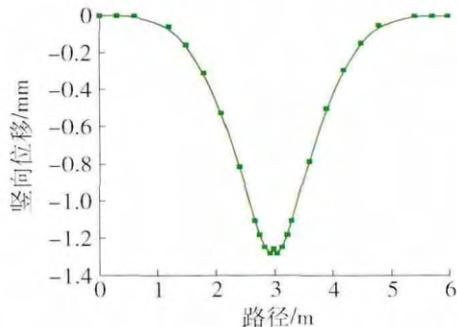


图 5 封层路表碎石竖向位移
Fig. 5 Vertical displacement of stones on chip seals

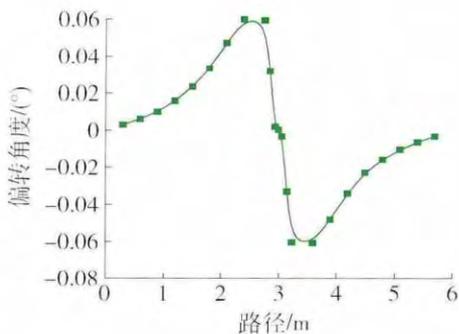


图6 封层路表碎石偏转角度

Fig. 6 Rotation angle of stones on chip seals surface

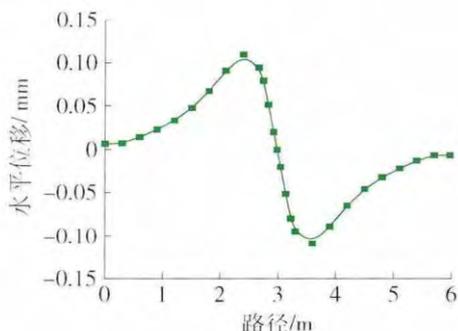


图7 封层路表碎石水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of stones on chip seals surface

及远离荷载作用区域的方向逐渐减小,减小速率先快后慢。轮迹内边缘碎石最大竖向变形值为 1.282 mm,轮隙处碎石略有隆起,位移仅次于轮迹内边缘,为 1.263 mm。按照现行的《公路沥青路面设计规范》规定,新建 1 条设计使用年限为 8 a 的三级公路,采用双轮组单轴静态设计,按照一般交通量考虑,计算所得的设计弯沉为 0.669 mm。由此可见,与传统的沥青混凝土路面相比,单层沥青碎石封层最大竖向变形要大很多,这也决定了封层更多地用在低等级路面结构中。

由图 6 可知,轮迹外边缘碎石偏转角度最大,为 0.06° ,碎石最大偏转角由轮迹外边缘向轮隙中心和远离荷载区域方向逐渐减小,轮迹内边缘偏转角为 0.017° ,比外边缘降低了 71%,轮隙中心的碎石基本不发生偏转。这表明碎石偏转角度的大小与碎石所在的位置有关,其中轮迹外边缘附近处碎石最易发生偏转。

由图 7 可知,与碎石偏转角度变化规律相似,轮迹外边缘附近碎石向轮迹内边缘推移,最大推移为 0.11 mm,轮隙处碎石基本不发生水平推移。碎石水

平位移沿轮迹中心和远离荷载区域方向逐渐减小,减小速率先快后慢。

碎石最大水平推移和最大偏转角度均分布在荷载两侧轮迹外边缘附近,碎石发生水平推移,碎石-沥青间黏结作用减弱,加速轮迹外边缘碎石转动,这也解释了封层早期为何轮迹外边缘处碎石最先发生松散、掉粒等破坏现象。

图 8 为沥青碎石封层路面在竖向荷载作用下的总位移云图分布,可以看出封层总位移沿深度逐渐减小,并向荷载作用区域两侧和土基四周逐渐递减扩散,封层两侧和底部没有变形。

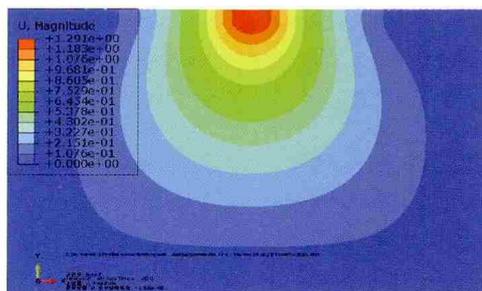


图8 封层总位移云图

Fig. 8 Displacement in chip seals

图 9 为沿深度方向各结构层顶面竖向变形,由图 9 可以看出,在荷载作用下,封层竖向变形主要为土基变形,封层碎石和基层的竖向变形相当。这可能是因为碎石和半刚性基层模量远远高于土基材料,使得碎石和半刚性基层本身变形较小,较薄的基层沿最短路径将荷载传递扩散给土基,导致土基变形最大。

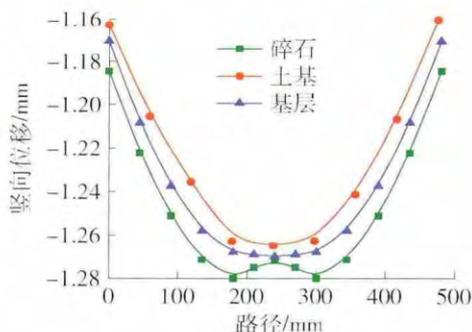


图9 各结构层顶面竖向位移

Fig. 9 Vertical displacement on each structure layer of chip seals

通过上述分析,可以得到以下结论:

1) 轮胎与封层碎石接触区域内,轮迹内边缘处碎石竖向位移最大,偏转角度较小;相反,较大的碎石偏

转角分布在轮迹外边缘处 并向两侧逐渐递减. 此外, 轮隙中心处碎石竖向位移较大, 但基本不发生偏转.

2) 轮迹外边缘附近碎石向轮迹内边缘推移, 且推移较大, 沿轮迹中心和远离荷载区域方向推移值逐渐减小.

2.2 沥青层力学行为

为研究碎石-碎石之间沥青层内部力学行为, 模型中计算了碎石与碎石间沥青层水平应变和剪应变, 并比较了不同位置处沥青层最大水平应变及剪应变大小. 轮迹中心碎石间沥青层内水平应变、剪应变云图及分布规律如图 10、11 所示.

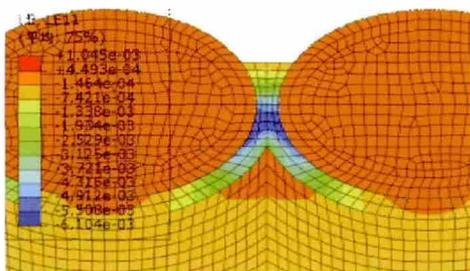


图 10 沥青层水平应变云图

Fig. 10 Horizontal strain in asphalt layer

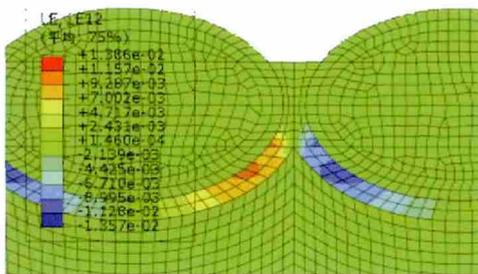


图 11 沥青层剪应变云图

Fig. 11 Shear strain in asphalt layer

由图 10、11 可知, 碎石间沥青层内的水平应变沿深度先增加后减小, 主要表现为压应变. 最大压应变分布在沥青层中部碎石-碎石间最短距离处, 沥青层上表面的水平变形大于下表面. 这主要是因为碎石间最短距离处的沥青量较少, 在周围碎石的水平挤压下, 沥青层内部抵抗力不足, 变形显著增大成为必然.

由图 12、13 可以发现, 轮迹内边缘沥青层内的水平压应变最大, 最大值为 5.04×10^{-3} , 约为其上表面和下表面的 1.86 ~ 2.63 倍. 沿轮迹外边缘和轮隙中心方向沥青层内最大水平变形减小, 这可能是轮迹内侧边缘附近, 碎石间挤压存在较强相互干涉、变形累积的原因.

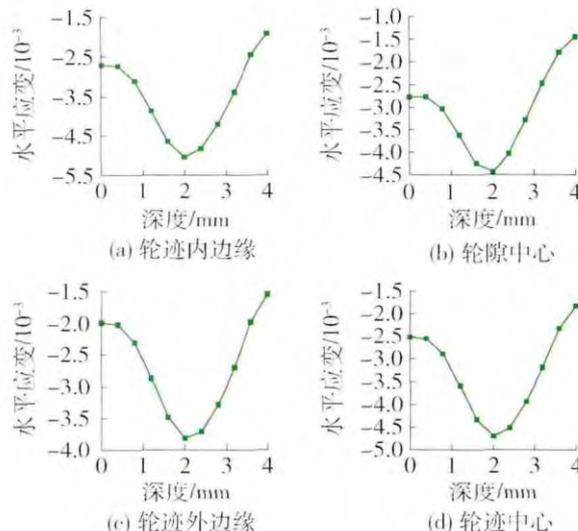


图 12 不同位置处沥青层内水平应变分布规律

Fig. 12 Horizontal strain distribution in asphalt layer

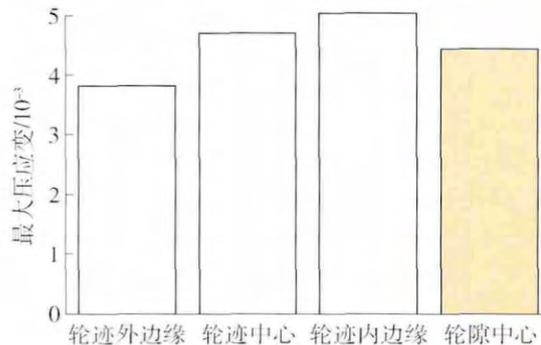


图 13 不同位置处沥青层内最大水平压应变比较

Fig. 13 Comparison of maximum horizontal compressive strain in asphalt layer

由图 14 可知, 沥青层上部剪切变形不明显, 沿沥青层深度方向, 剪应变迅速增大. 沥青层内最大剪应变发生在沥青层和沥青胶浆层接触面上, 轮迹外边缘最大剪应变为 1.29×10^{-3} , 约为沥青中部剪应变的近 40 倍.

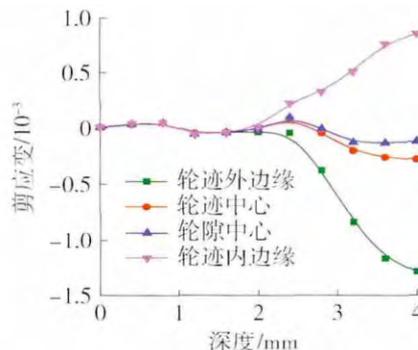


图 14 沥青层内剪应变分布规律

Fig. 14 Shear strain distribution in asphalt layer

图 15 为不同位置处沥青层内最大剪应变比较,对比发现沥青层内最大剪应变由轮迹外边缘→轮迹内边缘→轮迹中心→轮隙中心逐渐减小。其中轮迹外边缘沥青层内最大剪应变是轮迹内边缘处的 1.49 倍,轮迹内边缘、外边缘最大剪应变是轮迹中心、轮隙中心的 4.74~11.00 倍。由此可见,轮胎与路表接触范围内,沥青层最大剪切变形分布在轮迹外边缘碎石-碎石间沥青和沥青胶浆层接触面上,其次是轮迹内边缘处。

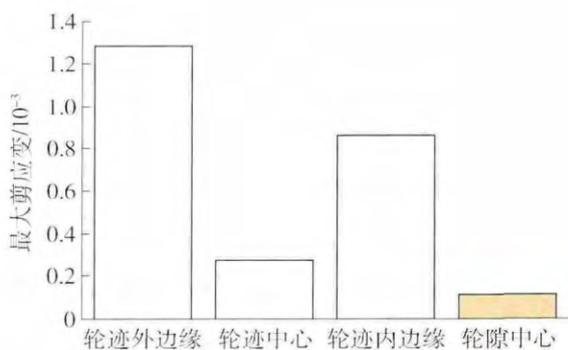


图 15 不同位置处沥青层内最大剪应变比较

Fig. 15 Comparison of maximum shear strain in asphalt layer

通过上述分析,可以得到以下结论:

1) 碎石-碎石间沥青层内的水平变形主要为受压变形,最大水平变形发生在轮迹内边缘处沥青层中间部位(碎石间最短距离中心处)。

2) 沿沥青层深度方向,剪应变显著增加,最大剪切变形分布在轮迹外边缘沥青层和沥青胶浆层接触面上,同时,轮迹内边缘沥青剪应变也不容忽视。

2.3 黏结层力学行为

为了观察碎石-沥青之间黏结层力学行为,在模型中沥青-碎石界面创建路径,提取黏结层界面的最大水平应变、最大剪应变、最大 Mises 应力力学指标,并与碎石-碎石间沥青层内的相应力学指标进行对比。表 4 为黏结层和沥青层不同力学指标的比较结果。

由表 4 可知,黏结层的最大水平应变是沥青层的 1.22 倍,最大剪应变是沥青层的 4 倍,最大 Mises 应力是沥青层的 1.5 倍。黏结层的最大水平应变、最大剪应变和最大 Mises 应力均发生在黏结层与胶浆层的交界处。这可能是由于该薄弱位置处材料属性差异性较大,沥青黏结层弹性模量远远小于碎石、胶浆层材料,此外,碎石表面在该处曲率半径较小,受到的应力较为集中。

表 4 黏结层与沥青层内不同力学指标的比较

Table 4 Comparison of maximum mechanical indexes between adhesive layer and asphalt layer

项目	最大水平应变 / %	最大剪应变 / %	最大在应力 / kPa
黏结层	0.65	1.20	120
沥青层	0.53	0.31	80

注:黏结层最大水平应变发生在黏结层中部,沥青层最大水平应变发生在沥青层中部;黏结层的最大剪应变和最大应力均发生在黏结层与胶浆层交界处;沥青层的最大剪应变和最大应力均发生在沥青层与胶浆层交界处。

一般地,变形幅度对材料间的约束状况有显著影响,过大变形或变形失调会使得它们失去约束,如剪切变形过大会使得材料从连续或接触状态转换为滑动状态,沥青碎石间黏结层下表面剪切变形过大,易使得碎石表面曲率半径较小处的黏结由受约束状态变为自由状态,进一步反射到上表面,黏结层彻底失效,封层碎石就会产生掉粒、推移损害。通过分析可以看出:

1) 黏结层的水平变形、剪切变形均大于沥青层。

2) 黏结层与胶浆层交界处具有最大等效 Mises 应力,形状改变比能较大,易发生剪切破坏。

2.4 胶浆层力学行为

在碎石颗粒下面,存在由沥青和基层表面粉状颗粒混合形成的沥青胶浆物质,为了观察碎石-基层胶浆层的力学行为,模型中在碎石颗粒下方的胶浆层创建路径,计算胶浆层水平应变、竖向应变和剪应变来反映胶浆层变形情况。

由图 16 可以看出水平方向上胶浆层两侧有较大的受压变形,碎石正下方变形较小。图 17 可以看出碎石两侧胶浆层有较大的剪切变形,碎石正下方剪切变形较小。图 18 中,竖直方向上,碎石正下方胶浆层主要产生受压变形,碎石两侧也有较大的受压变形。

由图 19、20 可知,最大水平压应变分布在碎石与胶浆层接触面两侧,其值为 0.5%,最大竖向压应变分布在碎石颗粒正下方胶浆层中心,其值为 1.0%,两者相差 2 倍。胶浆层的中心处,竖向压应变远远大于水平应变,碎石下方胶浆层两侧水平压应变大小接近竖向应变。可见,胶浆层变形情况较复杂,胶浆层中心主要为竖向变形,两侧主要为水平和竖向综合变形。由图 21 可知,胶浆层剪应变最大

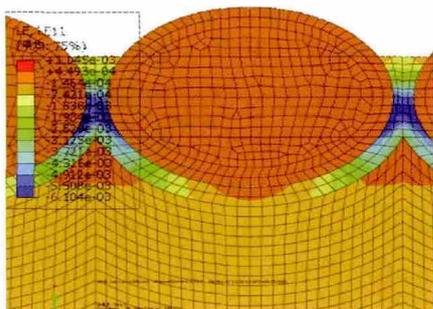


图 16 胶浆层水平应变云图

Fig. 16 Horizontal strain in asphalt mastic

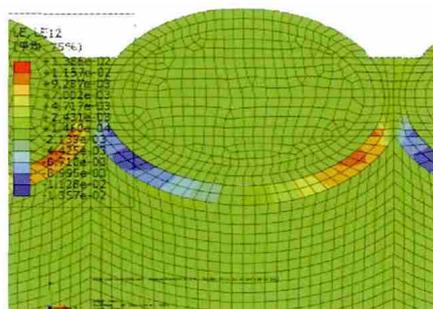


图 17 胶浆层剪应变云图

Fig. 17 Shear strain in asphalt mastic

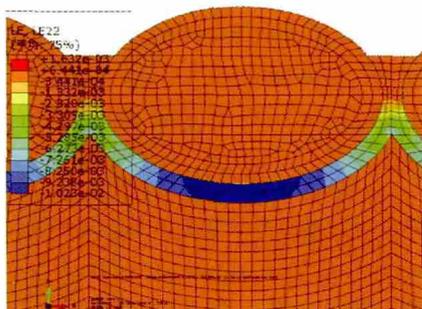


图 18 胶浆层竖向应变云图

Fig. 18 Vertical strain in asphalt mastic

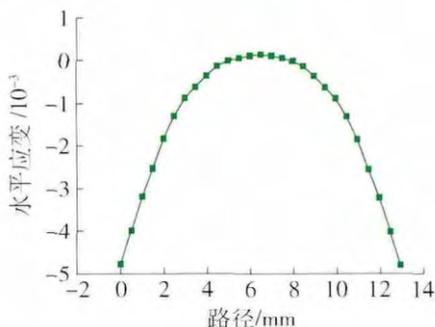


图 19 胶浆层水平应变分布规律

Fig. 19 Horizontal strain distribution in asphalt mastic

值分布在碎石和沥青胶浆接触面两侧,最大剪应变为 1.1%.

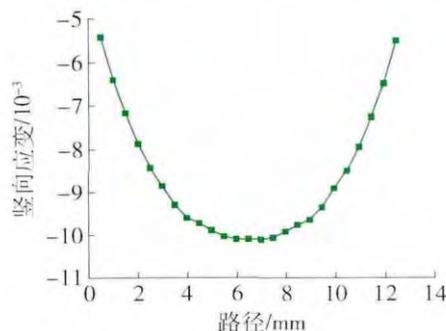


图 20 胶浆层竖向应变分布规律

Fig. 20 Vertical strain distribution in asphalt mastic

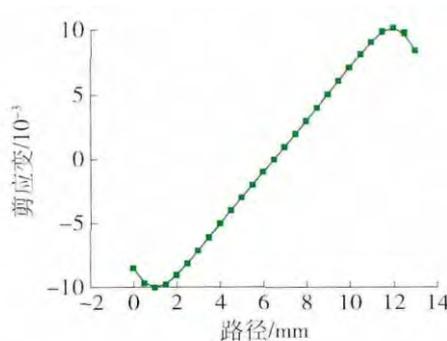


图 21 胶浆层剪应变分布规律

Fig. 21 Shear strain distribution in asphalt mastic

3 结论

1) 轮胎与封层碎石接触区域内,碎石在轮迹内边缘处竖向位移最大,偏转角度较小;相反,较大的碎石偏转角分布在轮迹外边缘处,并向两侧逐渐递减.轮隙中心处碎石竖向位移较大,但基本不发生偏转.轮迹外边缘附近碎石向轮迹内边缘推移,且推移较大,沿轮迹中心和远离荷载区域方向推移值逐渐减小.此外,封层碎石路面永久性变形主要表现为土基的变形.

2) 沥青层内的水平应变主要为压应变,最大水平应变发生在轮迹内边缘处沥青层中部.另外,沥青层上部剪应变变化不明显,随着沥青层深度增加,剪应变迅速增大,最大剪应变分布在轮迹外边缘沥青和沥青接触面上.轮迹内边缘剪应变也不容忽视.

3) 黏结层水平变形、剪切变形均不同程度大于沥青层.黏结层与胶浆层交界处具有较大等效 Mises 应力,易发生剪切破坏.

4) 碎石颗粒正下方的胶浆层主要为受压变形,两侧主要为水平和竖向综合变形.胶浆层两侧边缘处处主要表现为较高剪切变形.

(下转第 1906 页)

- [10] MEHL M, PITZ W J, WESTBROOK C K, et al. Kinetic modeling of gasoline surrogate components and mixtures under engine conditions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 193-200.
- [11] LI G S, ZHANG Z H, YOU F B, et al. A novel strategy for hydrous-ethanol utilization: demonstration of a spark-ignition engine fueled with hydrogen-rich fuel from an onboard ethanol/steam reformer [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(14): 5936-5948.
- [12] LU T F, LAW C K. A directed relation graph method for mechanism reduction [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1333-1341.
- [13] 蒋勇, 邱榕. 正庚烷复杂化学框架与全局简化机理构筑 [J]. 高等学校化学学报, 2010, 31(2): 312-319.
JIANG Y, QIU R. Constructions of skeletal and global reduced mechanisms for n-heptane complex chemistry [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2010, 31(2): 312-319. (in Chinese)
- [14] 肖干, 张煜盛, 郎静. DRGEP 联合 PCA 方法的详细机理自动简化 [J]. 内燃机工程, 2013, 34(3): 20-25.
XIAO G, ZHANG Y S, LANG J. Automatic reduction of DME ignition mechanism based on DRGEP and PCA method [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(3): 20-25. (in Chinese)
- [15] 刘建文, 熊生伟, 马雪松. 基于 DRG 和 QSSA 方法的煤油详细燃烧机理简化 [J]. 推进技术, 2011, 32(4): 525-529.
LIU J W, XIONG S W, MA X S. Reduction of kerosene detailed combustion reaction mechanism based on DRG and QSSA [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(4): 525-529. (in Chinese)
- [16] NODA T, HASEGAWA K, KUBO M, et al. Development of transient knock prediction technique by using a zero-dimensional knocking simulation with chemical kinetics [J]. SAE Technical Paper, 2004: 2004-01-0618.

(责任编辑 梁洁)

(上接第 1863 页)

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 中国公路建设行业协会. 农村公路建设与管理必读 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 郭寅川. 纤维沥青碎石封层结构行为及材料设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
GUO Y C. Structural behavior and material design of fiber reinforced chip seal [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [4] 张艳华. 半刚性基层沥青路面封层研究 [D]. 西安: 长安大学, 2005.
ZHANG Y H. Study of semi-rigid asphalt pavement seal coat [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [5] 刘丽. 沥青路面层间处治技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
LIU L. Study on the technology performance of asphalt pavement layer interfaces [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [6] 李曦. 碎石封层性能影响因素试验研究 [D]. 湖南: 长沙理工大学, 2009.
LI X. The testing research on the contribution factor of rushed stone seal coat performance [D]. Hunan: Changsha University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例讲解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 孙立军. 沥青路面结构行为理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [10] 汪海年. 沥青混合料微观结构及其数值仿真研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
WANG H N. The numerical simulation study of asphalt mesoscopic's structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [11] MILNE T, JENKINS K. Towards modelling road surfacing seal performance: performance testing and mechanistic behavioural model [J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2005, 3(47): 2-13.
- [12] 张爱霞. 沥青混合料微观结构初步分析 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
ZHANG A X. Numerical analysis on meso-structure of asphalt concrete [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)