

# 跳车作用下沥青路面的细观动力响应分析

余森开

(中铁十六局集团路桥工程有限公司,北京市 101500)

**摘要:** 为了深入研究沥青路面结构受跳车冲击荷载作用时的变形和应力扩展规律,从细观结构角度出发,基于沥青材料的非均质性,利用 Monte—Carlo 法生成随机骨料,建立了沥青路面结构的二维数值模型。利用 Abaqus 有限元软件进行了跳车冲击作用下沥青路面的受力性能分析。并在此基础上,对轴重与跳车高度进行了参数分析。结果表明:用细观有限元模型建立的二维模型可以很好地模拟荷载作用下沥青路面的受力形态与应力分布;不同汽车质量对接触压力峰值的影响极为明显,其中汽车质量达到 2 100 kg 时,接触压力峰值最大达到 688.75 kN,应力峰值达到 3.42 MPa;随着跳车高度的增加,沥青路面的接触压力逐渐提高,且在高度达到 75 mm 时,沥青路面的接触压力、峰值应力与变形逐渐趋于极限值。

**关键词:** 细观结构; 沥青路面; 二维数值模型; 有限元分析; 参数分析

沥青混合料作为一种由空隙、沥青胶结料和矿料组成的多相颗粒材料,其力学特性与材料结构极为复杂。空隙空间分布、沥青砂胶的材料性能以及沥青材料中集料与砂胶之间的作用效应都对沥青混合料的力学特性有着重要影响。对于早期针对沥青材料的数值计算研究中,通常采用假定沥青材料为连续介质的各向同性匀质体,没有反映沥青混合料材料内部的真实情况,使得最后的计算结果趋于理想化,最终难以得到令人满意的结果。

近年来,随着试验技术与研究设备的进步,大量研究通过切割或是无损的技术手段(如 X—ray CT 断层扫描技术)获取了沥青混合料内部的真实材料结构信息,结合数值图像处理技术,并利用现代高性能计算机对沥青混合料进行数值建模。其中 E. Masad 等利用数字图像处理技术对沥青混合料内部结构组成进行了细部分析,初步研究了沥青混合料的细观结构组成,并利用有限元软件分析了各向异性状况和集料长轴对沥青混合料受力性能的影响;郭庆林等采用数码摄像机采集了沥青混合料的切面图像,结合数值图像处理技术,建立了有限元分析数值模型,利用有限元软件进行了数值计算,对沥青混合料内部砂胶的应力分布与受力性能进行了研究分析。

该文以现有高速公路沥青路面为研究对象,从细观结构角度出发,基于沥青材料的非均质性建立细观

有限元计算模型。利用 Abaqus 有限元软件进行跳车冲击作用下沥青路面的受力性能分析。并在此基础上,对轴重与跳车高度进行参数分析,以期在今后同类型路面的设计、施工与研究提供参考。

## 1 细观计算模型的建立

### 1.1 随机分布数值建模的 Monte—Carlo 法

蒙特卡罗方法(Monte—Carlo Method)常被称作随机模拟方法,该方法起源于 20 世纪 40 年代中期,现今被称作统计试验或随机抽样。采用 Monte—Carlo 法模拟得到随机数系列的过程称为随机试验。获得  $[0,1]$  区间均匀分布下的随机变量,是获得随机数最简单的方法。在计算程序中得到区间  $[0,1]$  上最基本的随机数 rand,并对该随机数进行相应的变换,就可得到  $[a,b]$  上均匀分布的随机变量。

基于水泥或沥青混凝土类复合材料的结构特性,集料在试样中的生成可看作随机分布抽样过程。在计算模型建立时,利用蒙特卡罗方法进行材料粗骨料的随机生成。该文运用 Matlab 进行沥青材料粗骨料的生成,根据沥青材料空隙分布特点,将粗骨料等效为圆形建立沥青材料的有限元模型。其中利用 Matlab 随机生成建立的骨料模型如图 1 所示。

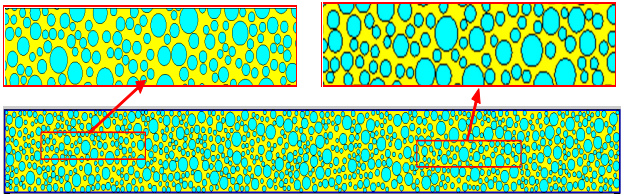


图1 沥青路面的骨料随机模型

1.2 材料参数

跳车冲击作用的计算模型依据中国普通沥青路面的典型结构形式和材料参数(表1)。其中路面上面层为4 cm SMA-13,中面层为6 cm AC-20,下面层为8 cm AC-25,基层为36 cm CTB,底基层为20 cm GM。该文路面模型的材料均采用线弹性模型。其中,SMA-13粗骨料的体积百分比为70%,AC-20与AC-25粗骨料的体积百分比为30%。

表1 沥青路面结构及材料参数

路面结构层	路面层厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	粗骨料粒径/mm
SMA-13	0.04	1 400	0.25	4.0~16.0
AC-20	0.06	1 200	0.25	17.5~22.5
AC-25	0.08	1 000	0.25	22.5~27.5
CTB	0.36	1 600	0.25	—
GM	0.20	250	0.35	—
SG	2.26	40	0.40	—

1.3 有限元模型的建立

采用Abaqus软件的动力分析模块进行了计算分析,沥青路面的有限元计算模型如图2所示。沥青路面的各相组分根据骨料分布将有限元骨料投影到计算模型上,并根据各相组分在网格中的位置进行材料与单元属性的赋予。各细观组分均采用四节点双线性平面四边形缩减积分单元进行离散。

计算模型的边界条件分为两部分:路面底层的固定约束与汽车车轮模型上侧施加转角约束。汽车模型(图2)分为3个部分:最上侧通过密度的设置来模拟车辆质量,最下侧设置为橡胶材料,两侧之间通过设置大刚度、小密度材料来进行上下两侧结构的连接。车轮半径设置为0.4 m,假定车辆重心高度为0.8 m。

为有效模拟车辆在路面上的运动情况,设定车轮以30 km/h的速度运行,路面总长度设定为10 m。同时设定车轮与路面为摩擦接触,设定接触的切向行为与法向行为,其中切向行为设定为罚函数接触,设定摩擦系数为0.02,法向行为设定为硬接触,允许接触面接

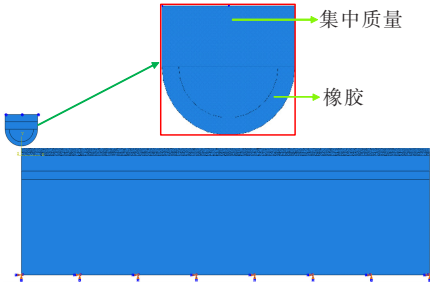


图2 有限元计算模型

触后分离。采用动力隐式分析模块,计入几何非线性。

2 计算结果分析

2.1 位移计算结果

为统一对比车轮在路面上的冲击作用,设置汽车总质量为1 500 kg,车轮离地高度为0.05 m,比较计算所得变形与应力应变结果。由于车轮在与地面弹性接触后,于路面处出现振荡,其中提取车轮底侧的竖向位移—水平位移曲线如图3(a)所示,提取车轮底侧的接触压力—水平位移曲线如图3(b)所示。根据图3,车轮与地面出现不断的接触与分离,并在4 m处完全与路面接触,不再出现分离。

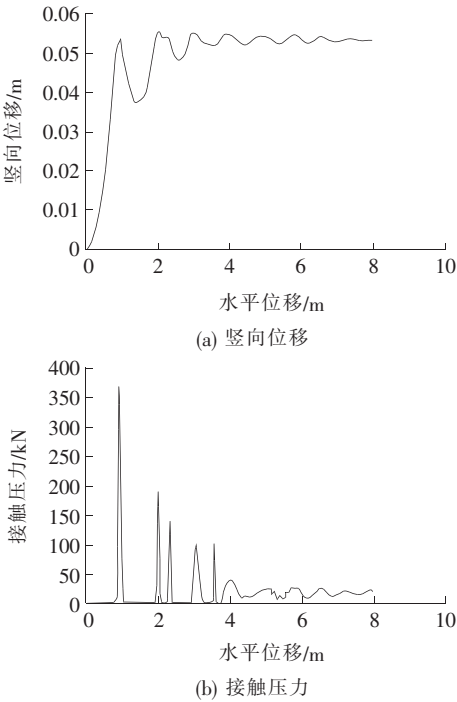


图3 位移与接触压力计算结果

从图3可知:轮胎在首次冲击地面后弹起的竖向位移为0.014 m,第二次弹起的竖向位移为0.006 m,仅为首次弹起高度的1/2,并在随后逐渐趋于平缓。

于此相同,轮胎首次接触地面的接触压力为 362.75 kN,第 2 次弹起的接触压力为 189.39 kN,仅为首次接触产生压力的 1/2,并在随后逐渐趋于平缓。相比竖向位移的变化,接触压力在第 2 次弹起后,路面出现回弹,这使得轮胎与路面的第 3 次接触立即出现,同时,第 4、第 5 次接触也出现了相同的现象,路面的恢复变形减轻了轮胎与路面的冲击作用。

## 2.2 应力计算结果

提取第 1 次轮胎与路面接触的局部应力云图如图 4 所示。

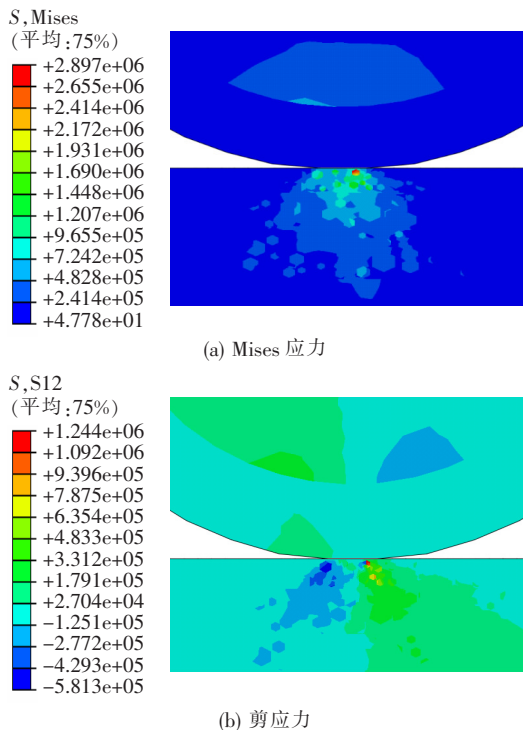


图 4 局部应力计算结果(单位:Pa)

从图 4 可以看出:在汽车荷载作用下,路面应力分布呈现扇形,且于路面粗骨料与沥青接触处出现应力集中。同时,轮胎底侧橡胶与汽车连接处也出现应力集中现象,路面与轮胎在跳车冲击作用下皆出现弹性变形。路面的局部变形与应力分布受到粗骨料刚度影响出现不均匀分布,细观计算模型能够更加详细地描述荷载作用下沥青路面的受力性能。

提取前 3 次轮胎与路面接触的应力云图如图 5 所示。

由图 5 可知:随着车轮的前进轮胎与路面接触的应力峰值逐渐减低,由第 1 次接触的 2.89 MPa 降低至第 3 次接触的 0.69 MPa。随着车轮的前进,在摩擦力与冲击力的共同作用下,路面中心处出现了明显的应力变化,且第 3 次接触时应力变化更为明显。利用

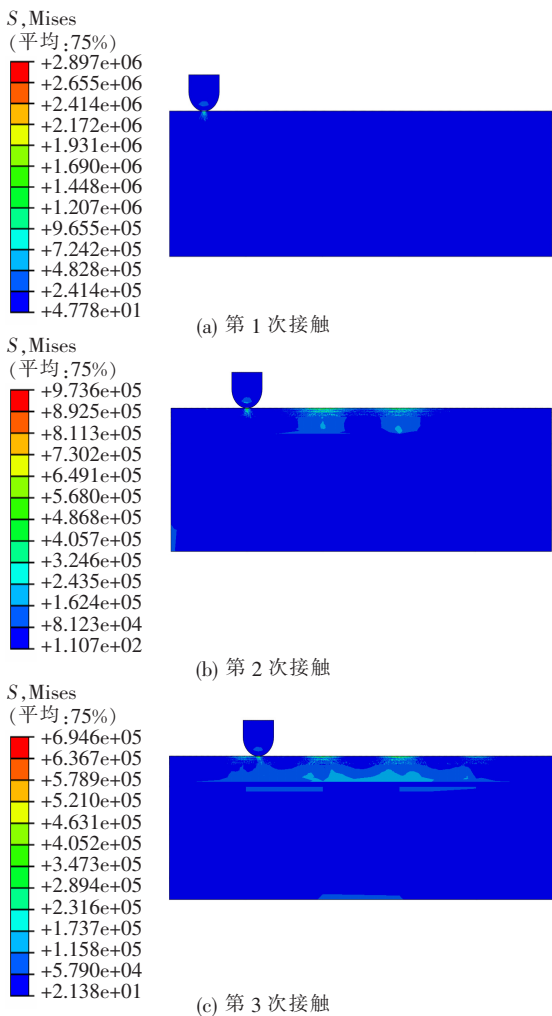


图 5 应力计算结果(单位:Pa)

细观有限元模型建立的二维模型可以很好地模拟荷载作用下沥青路面的受力形态与应力分布。

## 3 轴重与跳车高度的参数分析

### 3.1 轴重对沥青路面受力性能的影响

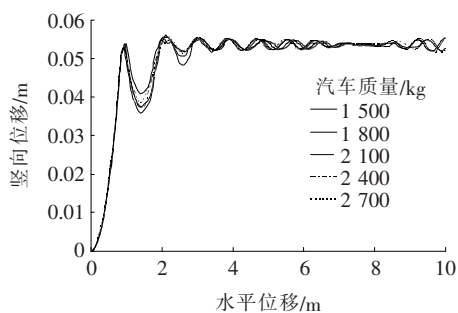
为研究汽车质量对沥青路面受力性能的影响,在上述计算模型的基础上,对汽车质量进行了参数分析,根据该文计算模型,取 1 500、1 800、2 100、2 400 与 2 700 kg 的汽车质量进行计算分析,计算得到的车轮底侧的竖向位移—水平位移曲线如图 6(a)所示,车轮底侧的接触压力—水平位移曲线如图 6(b)所示。

由图 6 可知:不同汽车质量的竖向弹起高度峰值变化不大,其中质量为 2 100 kg 时,竖向弹起高度峰值最大。而汽车质量对接触压力峰值的影响较为明显,其中质量为 2 400 kg 的接触压力峰值最大,达到 688.75 kN,路面应力达到 3.42 MPa,质量提高引起

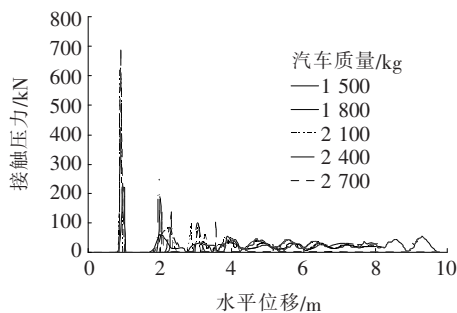
接触压力的变化极为明显。

### 3.2 跳车高度对沥青路面受力性能的影响

为研究跳车高度对沥青路面受力性能的影响,在上述计算模型的基础上,对跳车高度进行了参数分析,

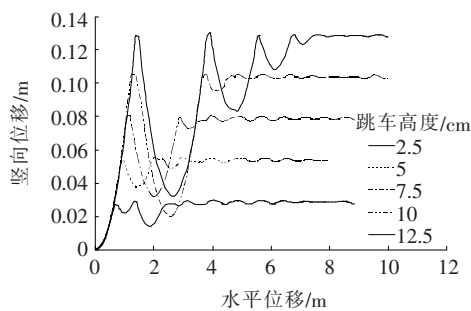


(a) 竖向位移

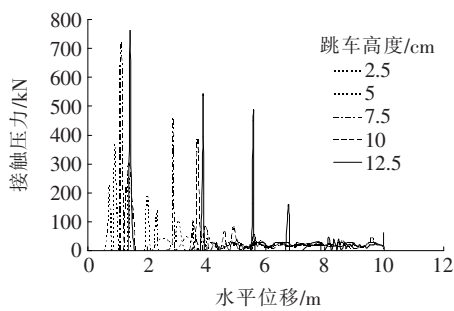


(b) 接触压力

图6 汽车质量对竖向位移及接触压力的影响



(a) 竖向位移



(b) 接触压力

图7 跳车高度对竖向位移及接触压力的影响

由图7可知:随着跳车高度的增加,车轮与沥青路面首次接触的接触压力逐渐提高,且在跳车高度达到75 mm时,沥青路面的接触压力、峰值应力与变形逐渐趋于极限值。其接触压力逐渐趋于750 kN,跳车高度取75 mm进行跳车冲击作用的计算可以有效分析得到该沥青路面在跳车作用下的极限状态。

## 4 结论

(1) 轮胎在首次冲击地面后弹起的竖向位移为第2次弹起竖向位移的两倍,与此相同,轮胎首次接触地面的接触压力为第2次接触地面的接触压力的两倍,并在第3次接触地面后位移与接触压力逐渐趋于平缓。利用细观有限元模型建立的二维模型可以很好地模拟荷载作用下沥青路面的受力形态与应力分布。

(2) 不同汽车质量对接触压力峰值的影响极为明显,其中汽车质量达到2 100 kg时,接触压力峰值最大达到688.75 kN,应力峰值达到3.42 MPa。

根据该文计算模型中车轮的半径,取2.5、5、7.5、10与12.5 cm的跳车高度进行计算分析,得到的车轮底侧的竖向位移—水平位移曲线如图7(a)所示,车轮底侧的接触压力—水平位移曲线如图7(b)所示。

(3) 随着跳车高度的增加,车轮与沥青路面首次接触的接触压力逐渐提高,且在跳车高度达到75 mm时,沥青路面的接触压力、峰值应力与变形逐渐趋于极限值,跳车高度取75 mm进行跳车冲击作用的计算可以有效分析得到该沥青路面在跳车作用下的极限状态。

(4) 鉴于沥青材料的非均质性、路面不平整性、汽车动力荷载的随机性等因素对沥青路面受力性能的影响,还需进一步开展相关的试验研究与理论分析。

### 参考文献:

- [1] 余四新,徐飞萍,刘甲荣,等.基于新版沥青路面设计规范的路面结构设计分析[J].中外公路,2019(2).
- [2] 钟彪.沥青混凝土路面预防性养护措施决策与应用[J].中外公路,2018(6).
- [3] 严守靖,刘敬辉,杨泽众,等.沥青路面路基工作区深度研究[J].中外公路,2018(5).
- [4] 黄文柯.沥青混合料细观结构的三维粘弹本构及虚拟力学试验研究[D].华南理工大学博士学位论文,2016.



# 荷载与温度耦合作用下“白加黑”复合式路面 沥青加铺层的受力分析

朱春福<sup>1,2</sup>, 程培峰<sup>2\*</sup>, 赵广宇<sup>1,2</sup>

(1. 东北农业大学 园艺园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 东北林业大学 土木工程学院)

**摘要:** 为研究正常使用状态下“白加黑”路面沥青加铺层结构的受力性能,利用 Ansys 有限元分析软件构建路面结构模型,根据不同车轮作用位置,分成不同工况考虑温度与车辆的耦合作用,分析降温前后最大应变变化情况及出现的位置,发现降温变化对沥青加铺层结构的不利影响,并探讨较易出现裂缝的位置及裂缝的形式。分析结果表明:温度变化尤其是降温过程会大幅增加加铺层底张拉应变,加速其裂缝的产生;张拉裂缝与剪切裂缝可能出现在距水泥路面接缝 1/2 车轮范围内的区域,其中接缝区域较易出现剪切型裂缝,剪切裂缝一般为上宽下窄,张拉裂缝为下宽上窄。进行“白加黑”路面沥青加铺层裂缝的防治,要重点防治接缝区域的剪切裂缝和距接缝 1/2 车轮范围内的张拉裂缝。

**关键词:** “白加黑”路面; 沥青加铺层; 耦合作用; 裂缝; 车轮位置

截至 2018 年底,中国公路通车总里程达 484.65  $\times 10^4$  km。其中,水泥混凝土路面由于具有力学强度高、承载能力强、耐久性好、经济性良好等优点,在中国的路面结构中占据重要地位。随着交通流量和轴载的增加,中国水泥混凝土路面的缺点逐渐凸显:平整度、舒适性差;基层抗冲刷不满足要求;路面维修困难等。为了改善路面的服务性能,工程人员研究出在水泥混凝土板上铺筑沥青面层的刚柔复合式路面。这种路面通过普通水泥混凝土或碾压混凝土板满足承载力需求,沥青面层的目的是提高路面的平整度、改善行车舒适性、降低噪声和改善雨天行车安全性。同时,水泥混凝土的强度和抗冲刷能力又比半刚性基层材料大很多,因此,刚柔复合式路面在中国道路建设中有着广阔的应用前景。

当前,在水泥混凝土路面的升级改造中,也常采用

在旧水泥混凝土路面上加铺沥青混凝土面层的方法。但使用过程中,由于两种结构层材料性能差异较大、旧水泥混凝土路面存在裂缝和接缝、温度产生的水平位移及荷载产生的竖向位移周期性反复作用,旧水泥混凝土面板产生的拉应力传递至沥青混凝土加铺层,当拉应力超过沥青混凝土加铺层抗拉强度时,沥青混凝土加铺层会在旧水泥混凝土面板接缝、裂缝处产生反射裂缝。

路面在服务期间,既受到外界温度变化的影响,也要承受车辆荷载的作用。为了探讨温度与车辆荷载耦合作用对“白加黑”路面加铺层的影响,该文借助通用有限元程序 Ansys 对加铺沥青面层的水泥混凝土路面建模,进行力学分析,结合路面钻芯取样,寻找反射裂缝产生和发展的规律,为延缓反射裂缝的出现和防治提供参考数据。

- \*\*\*\*\*
- [5] Masad E, Tashman L, Samedavan N, et al. Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 374-383.
- [6] 郭庆林,程永春,陶敬林. 沥青混凝土数字图像集料粘连

- 效应分割方法研究[J]. 公路交通科技, 2015(3).
- [7] 王春昱,胡海军,白志刚,等. 基于 CEL 算法的沥青路面动水压力数值模拟分析[J]. 交通节能与环保, 2018(3).
- [8] 程永春,郭庆林,谭国金,等. 沥青混合料图像矢量化建模的改进方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013(5).

收稿日期:2019-11-26(修改稿)

基金项目:黑龙江省交通运输厅重点科技项目(编号:HLJ2015-10)

作者简介:朱春福,男,博士研究生. E-mail:zcf\_abc@163.com

\* 通信作者:程培峰,男,博士,教授. E-mail:chengpeifeng@126.com