

# 不同橡胶沥青路面结构静载力学数值分析

刘伟

(海南省交通工程检测中心, 海南 海口 571199)

**摘要:** 为探讨不同结构沥青路面在静载作用下的力学性能, 基于 ANSYS 有限元理论, 拟定 3 种类型橡胶沥青路面结构并建立静力学有限元模型, 分别针对沥青层层底拉应变、沥青层剪应力和半刚性基层拉应力进行数值分析。结果表明, 3 种结构路面在荷载作用下沥青层第一层层底均出现压应变, 路面深度增至临近第二层层底时逐渐转变成拉应变; 沥青层层底发生拉应变主要是由于沥青层模量和基层类型的影响; 3 种结构沥青路面层剪应力均随着路面深度的增加呈现先增后减的趋势。

**关键词:** 公路; 橡胶沥青路面; 静力学分析; 数值分析

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)05-0072-03

橡胶沥青混合物具有良好的路用性能与结构特点, 在中国公路工程建设中得到较多运用。但中国地域广阔, 气候复杂, 路面材料多样, 路面结构应根据不同地区和材料进行设计。目前, 中国橡胶沥青路面结构设计不尽合理, 且形式单一, 不仅造成路面使用寿命不长, 也带来严重的交通安全隐患。合理设计橡胶沥青路面结构能减少路面车辙、反射裂缝、坑槽等早期病害, 提升橡胶沥青路面的使用寿命。为了避免不同地区路面过早发生损坏, 针对橡胶沥青路面结构形式进行研究十分迫切。

由于橡胶沥青混合料的路用性能比一般沥青混合物更具优势, 越来越多的路面采用加铺橡胶沥青应力吸收层的办法, 故路面结构类型逐渐增多, 针对不同类型橡胶沥青路面结构展开力学分析极为重要。该文拟定 3 种类型橡胶沥青路面结构, 运用 ANSYS 有限元软件, 对其力学响应展开数值分析, 研究不同结构层中应力应变发展规律, 为该类型路面结构优化设计提供理论支持。

## 1 模型建立

### 1.1 路面结构拟定

考虑到沥青路面的结构特征和组合设计原则, 设计 3 种代表性路面结构, 其面层均为 2 层, 基层均为半刚性基层。同时, 为防止基层裂缝反射导致路面结构出现裂缝, 在基层上铺设橡胶沥青应力吸收层或密级配沥青稳定碎石混合物(见图 1)。路面结构中各材料的力学参数见表 1。

依据 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》,

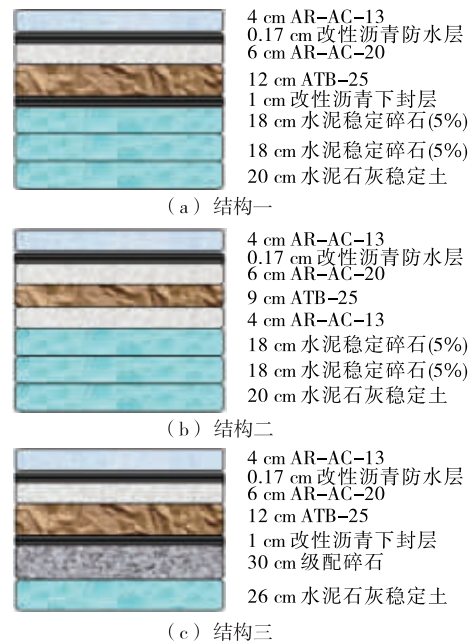


图 1 路面结构形式

表 1 路面材料计算参数

材料	模量 A	模量 B	泊松比
AR-AC-13C	1 600	2 200	0.30
AR-AC-20C	1 200	1 800	0.30
ATB-25	1 000	1 400	0.30
级配碎石	350	350	0.30
水泥稳定碎石	1 500	1 500	0.20
水泥石灰稳定土	1 000	1 600	0.30
土基	41	41	0.35

注: 模量 A 表示竖向位移和应变模量; 模量 B 表示切应力、弯拉应力及应变模量。

借助路面设计软件 HPDS 对路面结构进行详细验算,得出 3 种路面结构均符合层底拉应力和弯沉值的设计要求。

## 1.2 建立模型

基于弹性层状体系理论,分别考虑结构内沥青层的特征和级配碎石结构的非线性特征,采用 ANSYS 软件建立路面结构有限元模型,将计算范围长 5 m、宽 5 m、高 5 m 区域拟定为路面结构三维几何模型(见图 2)。采用八节点 Solid45 单元模拟结构中各材料,共计 880 000 个。将模拟结构中垂直面上水平方向和底部设置为粘滞边界,路面面层设为自由边界,选用标准轴载 100 kN、胎压 0.7 MPa 进行加载。

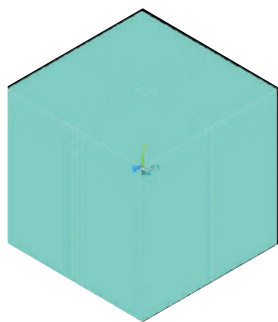


图 2 路面结构有限元计算模型

在数值模拟中,X、Y、Z 方向分别取道路行车方向、路面垂直向下方向和横断面方向。由于试验为静力学分析,无需考虑车轮荷载产生的水平作用力,应变空间位置和最不利应力均处于 X-Y 平面内,只需分析 X-Y 平面中路面结构的应力、应变与位移。另外,考虑到应变、应力最大值通常出现在 X 方向上的车轮中心,故 X 坐标取 2.5;而 Y 方向,面层和基层分别以每 1、2 cm 取一个值。网格划分模型见图 3。

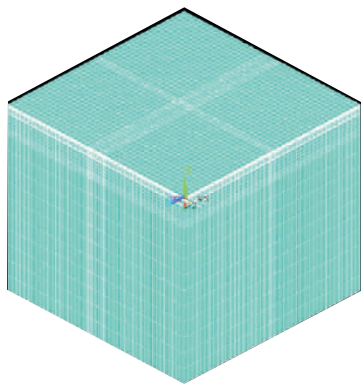


图 3 路面结构网格划分

## 2 结果分析

### 2.1 沥青层层底水平向应变分析

根据文献[7],在复合式基层与半刚性基层沥青路面中,沥青混合料在 X 方向均表现为压应变,但沥青结构层中同时存在拉应变。将沥青层内每 1 cm 拟定成一个计算点,通过计算得知各层材料的层底位置均产生相应的最大拉应变,故结构计算中只需考虑各沥青层层底的拉应变。3 种结构中沥青层层底应变水平见图 4。

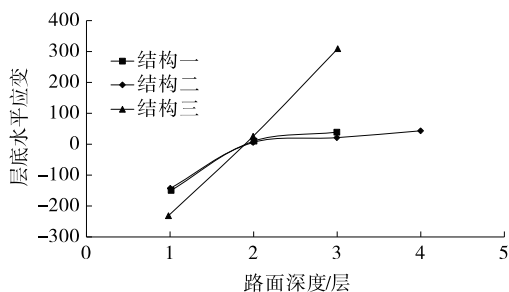


图 4 沥青层层底水平向应变发展规律

由图 4 可知:结构一、二中沥青层层底沿 X 方向的拉应变发展曲线相似,其层底水平应变与路面深度基本呈正比例关系,而结构三存在较大差异;处于上面层层底时,3 种路面结构中的水平应变均表现为压应变(负值),路面深度增加至临近第二层时压应变逐渐转换成拉应变。

根据相关研究成果,若多层弹性层状体系中接触面相连材料的泊松比和模量均一致,且受到双圆均布荷载作用完全连续,则接触面不会对应力和应变分布产生影响,即视为一层路面结构;当接触面上方材料模量小于下方时,下方出现相对较小应变,且接触面的连续会制约上方发生应变。在柔性沥青路面中沥青混合料的模量为基层材料的 5 倍,故结构一、二沥青层第二层底沿 X 方向的应变增长速率逐渐变缓;而结构三中接触面上下层材料不会相互制约,故应变增长速率保持不变。和结构一相比,结构二在基层上方多铺设了 4 cm 应力吸收层,其对水平应变的影响较明显,使第二、三层水平应变增长速率有所减缓,其原因为应力吸收层限制了上层应变。结构三水平应变幅度比结构一、二大,三者的沥青层厚度大致相同,故变幅过大的原因是沥青层模量和基层类型不同。结构三基层选用级配碎石层,具有强度高、板性强和卸载快等特征,故沥青层层底水平应变受外部因素的影响较小。

## 2.2 半刚性基层拉应力分析

对3种路面结构拉应力分布进行模拟计算,得出结构上部和下部的拉应力分别集中于 $X$ 、 $Z$ 方向,均与路面实际情况相符( $X$ 、 $Z$ 方向分别为表层开裂和结构内反射裂缝方向)。因此,对于复合式基层路面,以每2 cm为计算点分析半刚性材料层的拉应力发展规律;而柔性基层路面仅进行非线性分析。3种结构基层的拉应力变化规律见图5。

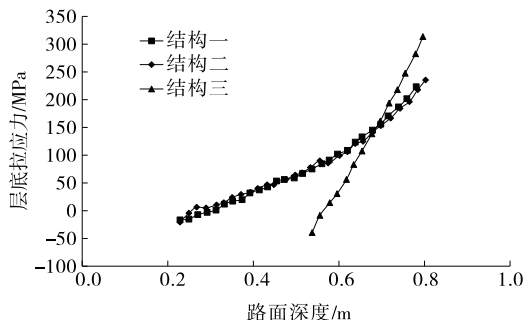


图5 半刚性基层拉应力发展规律

由图5可知:结构一、二的应力发展曲线基本一致,其原因为两者结构形式类似,半刚性材料层的下卧程度较浅,使顶部产生压应力,路面深度增加时材料层顶部压应力逐渐转换成拉应力。半刚性基层的强度较高,即使其内部发生拉应力现象,整体应力水平也远小于材料本身抗弯强度。结构三中基层拉应力分布与结构一、二区别较大,原因是其基层结构为柔性基层,结构内级配碎石只受压应力作用,但路面深度增加到一定程度后压应力逐渐转换为拉应力,且应力增长速率快。结构三顶面拉应力比结构一、二分别大58%、60.6%,底面拉应力分别大38.4%、33.3%。综上,3种路面结构中结构三的应力水平最高,复合式基层路面的力学性能更优异。

## 2.3 沥青层剪应力分析

根据剪切胡克定律,剪应力和剪应变分析等效,故在沥青层剪应力分析中采用 $XY$ 方向力对 $X-Y$ 平面内的剪应力进行分析。由于复合式基层路面中半刚性材料具有较高的强度,剪应力对面层产生的变形远大于基层,主要针对沥青面层进行剪应力分析。将车轮荷载外侧拟定为作用点,沿路面垂直向下方向每1 cm设为一个计算点,对3种结构面层剪应力分布进行计算,结果见图6。

由图6可知:随着路面深度的增加,3种结构沥青路面剪应力均呈先增后减趋势,路面深度为7 cm时结构内中面层剪应力达到最大值,该面层需采

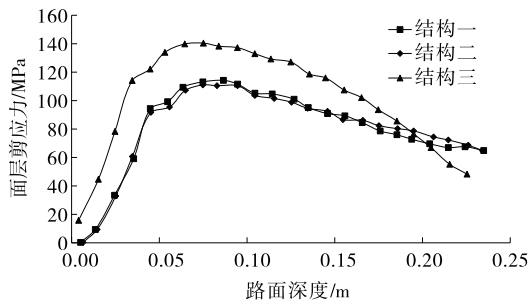


图6 沥青层剪应力发展规律

用强度较高的材料;结构一、二剪应力达到最高值后的降幅大致相同,而结构三降幅更明显。结构三沥青层顶面剪应力和最大剪应力比其他两种结构分别大24.2%、26.8%,表明3种路面结构中结构三沥青层受剪应力的影响最大。其原因是3种路面结构中基层类型和模量不同,对于柔性基层路面,其基层内级配碎石材料层的强度、模量均较小,当面层受到静载作用时沥青层易发生剪切变形。

## 3 结论

(1) 静载作用下3种结构路面沥青层第一层层底均出现压应变,路面深度增至临近第二层层底时逐渐转变成拉应变。在3种路面结构的沥青层层底,结构一拉应变最小,结构二压应变最小,结构三的各项力学指标均最大。

(2) 沥青层模量和基层类型是导致沥青层层底发生拉应变的主要原因。由于结构三基层采用半刚性材料,具有强度高、板性强、卸载能力强等特点,其沥青层层底的应变情况最差。

(3) 结构一、二的拉应力发展规律基本相同,是因为两者结构形式类似,半刚性材料层的下卧程度较浅,使顶部产生压应力,当路面深度增加时材料层顶部压应力逐渐转换成拉应力。半刚性基层的强度较高,即使内部发生拉应力现象,整体应力水平也远小于材料本身的抗弯强度。结构三采用柔性基层,结构内级配碎石只受压应力作用,但路面深度增加到一定程度压应力逐渐转换为拉应力,且增长快。

(4) 随着路面深度的增加,3种结构沥青路面剪应力均呈先增后减的变化趋势,路面深度为7 cm时结构内中面层剪应力达到最大值。

## 参考文献:

[1] 任园.反应型橡胶改性沥青混合料性能研究[D].南京:

(下转第78页)

表 6 两种工艺所得改性沥青混合料的性能指标

方案	稳定度/kN	流值/ (0.1 mm)	残留稳 定度/%	冻融劈裂 强度比/%	动稳定度(60 ℃,0.7 MPa)/ (次·mm <sup>-1</sup> )
方案一	7.50	44	85.0	80.0	875
方案二	9.31	37	90.3	84.8	3 300
方案三	14.10	35	90.2	89.4	6 120
技术要求	≥8	1.5~4	≥85	≥80	≥2 800

由表 6 可知:干法工艺制备得到的沥青混合料的各项性能指标符合并远超过技术要求,与基质沥青相比得到实质性改善,说明 SBS-T 的加入显著改善了沥青混合料的路用性能。干法与湿法的改性效果基本相当,部分指标超过湿法工艺,如反映高温抗车辙能力的动稳定度提高 85%,反映混合料强度的马歇尔稳定度提高 51%,反映水稳定性的冻融劈裂强度比提高 5%。可见,干法工艺作为传统方法的替代方案能满足公路建设的需要。

### 3 结论

(1) SBS-T 在干法拌和过程中能迅速溶解,其中预先粉碎并溶胀的 SBS 改性剂在集料的挤压和剪切力作用下发生交联反应形成稳定的三维网络结构,能显著提高沥青及沥青结合料的宏观指标,提升沥青结合料的高、低温性能。

(2) 干法工艺的改性效果优于常规的湿法改性,特别在高温抗车辙能力方面提升幅度较大。

(3) 作为湿法改性工艺的替代方案,使用直投 SBS 改性技术能避免成品改性沥青性能指标的衰减,显著改善路面质量,具有较大推广应用价值。

### 参考文献:

- [1] 张德勤.石油沥青的生产与应用[M].北京:中国石化出版社,2001.
- [2] 王涵,邓文广,李佰昌,等.基于黏弹力学的 SBS 改性沥青改性剂网络结构研究[J].石油炼制与化工,2017,48(1).
- [3] Wekumbura C J, Stastna L Z. Destruction and recovery of internal structure in polymer-modified asphalts[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(3).
- [4] Ragab M, Abdelrahman M, Ghavibazoo A. Performance enhancement of crumb rubber-modified asphalts through control of the developed internal network structure[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2371.
- [5] Dealy J M, Tsang W M. Structural time dependency in the rheological behavior of molten polymers[J]. The Journal of Applied Polymer Science, 1981, 26(4).
- [6] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [7] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].

收稿日期:2017-03-20

\*\*\*\*\*

(上接第 74 页)

东南大学,2015.

- [2] 孙学伟. AR-AC13 橡胶沥青混合料设计与施工[J]. 中外公路, 2008, 28(5).
- [3] 冯凌兵, 蒋育红, 李妍, 等. 重载交通下的不同沥青路面结构适应性分析[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2011, 21(4).
- [4] 吴旷怀, 王伟明, 李燕枫, 等. 兴畚高速公路橡胶沥青试验路段路面结构与材料组成设计[J]. 中外公路, 2012, 32(6).
- [5] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范[S].
- [6] 雷文茂. 复合式基层长寿命沥青路面结构分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.

- [7] 庞付强. 橡胶沥青路面结构优化设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [8] Randy C West, Jingna Zhang, Jason Moore. Evaluation of bond strength between pavement layers[R]. National Center for Asphalt Technology, 2005.
- [9] 李佳庆, 雷凡. 湿法橡胶沥青配比设计 & 水稳定性试验研究[J]. 公路与汽运, 2015(2).
- [10] 谢冬喜, 李智, 张志强. 基于 CAVF 法的温拌橡胶沥青混合料性能研[J]. 公路与汽运, 2015(3).
- [11] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

收稿日期:2017-03-08