

# 基于Abaqus分析的BRT站点沥青路面不同轴载应力响应研究

徐伟<sup>1</sup>, 钱治杭<sup>2</sup>, 肖春<sup>1</sup>, 李诗宇<sup>2</sup>

(1. 中恒工程设计院有限公司, 四川 成都 610065; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** BRT站点路面结构组合优化的目的, 是提供一种能承受预期车辆轴载作用并在预定设计年限内同所处外部环境相适应的路面结构组合设计。从提高BRT站点路面沥青混合料抗剪强度的角度出发, 通过工程实例和文献调研, 提出了SMA+AC路面、双层SMA路面、半柔性路面以及环氧沥青路面共4种抗车辙性能较高的路面结构组合方案, 通过Abaqus有限元软件对不同轮压下4种路基段路面结构组合方案的应力响应情况进行分析, 分析不同路面结构的沥青面层剪应力、沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力及路基顶压应变的变化趋势, 从数值分析的角度, 得出不同沥青面层组合方案在不同轴载时的敏感性和适应性。

**关键词:** BRT; 沥青路面; Abaqus分析; 应力响应

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0248-04

## Research on Stress Response of Asphalt Pavement at BRT Stations under Different Axle Loads Based on Abaqus Analysis

XU Wei<sup>1</sup>, QIAN Zhihang<sup>2</sup>, XIAO Chun<sup>1</sup>, LI Shiyu<sup>2</sup>

(1. Zhongheng Engineering Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610065, China; 2. Northwest Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The purpose of optimizing the pavement structure combination of BRT stations is to provide a pavement structure combination design that can withstand the expected vehicle axle load and adapt to the external environment within the predetermined design period. Starting from the perspective of improving the shear strength of asphalt mixture on BRT station pavement, through the engineering examples and literature research, four pavement structure combination schemes of SMA+AC pavement, double-layer SMA pavement, semi-flexible pavement and epoxy asphalt pavement with high anti-rutting performance are proposed. The stress response of the four pavement structure combination schemes under different wheel pressures is analyzed by using Abaqus finite element software. The changing trends of asphalt surface shear stress, asphalt mixture bottom tensile strain, lower base bottom tensile stress and subgrade top compressive strain of different pavement structures are analyzed. From the perspective of numerical analysis, the sensitivity and adaptability of different asphalt surface combination schemes under different axial loads are obtained.

**Keywords:** BRT; asphalt pavement; Abaqus analysis; stress response

## 0 引言

BRT站点路面受到重轴载、大轴重、低速、频繁启停以及高温等不利因素带来的车辙、拥包等病害, 亟待提出针对BRT站点沥青路面方案, 并有针对性的优化路面结构组合方案, 并进行模拟仿真了解其应力响应状态。

通过对不同结构类型和不同模量的沥青面层结

构层次的合理布置与组合, 研究沥青混合料模量的差异、结构类型以及结构层厚度的不同引起的交通荷载作用下的力学响应指标变化特征, 进而实现对路基段BRT站点路面有针对性的进行结构组合优化的目的。

## 1 路面结构组合优化

要有效控制车辙等病害在路面工作年限内不恶化到低于某一规定水平, 路面结构组合优化至关重要。为保证研究成果可信, 本次BRT站点路面结构优化按照以下原则: 按照BRT站点交通轴载和轴重

收稿日期: 2024-03-22

作者简介: 徐伟(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市交通规划、道路交通设计工作。

程度优化面层类型和厚度;沥青混合料面层需满足结构强度、稳定性以及路表性能要求;能适应荷载应力分布特征以及符合沥青材料的结构特性;在各种自然环境下稳定性良好;结合施工工艺选择恰当的结构层数和层厚;适当考虑当地经济水平、施工水平和使用经验。

研究表明路基段 BRT 站点沥青路面采用水泥稳定碎石半刚性基层是适用的交通条件、自然环境和经济水平的<sup>[1]</sup>。结合国内外路面设计结构类型和病害处治的工程案例,需要解决 BRT 站点的低速、大轴重、重轴载、定点启停以及高温带来的车辙、拥包等病害,在沥青面层结构中重点对上、中、下面层的结构类型、胶结料、改性剂和外加剂进行结构组合优化,并综合采用沥青混合料的抗剪强度高、高温稳定性好、水稳性好和模量高的沥青面层结构组合方案<sup>[2]</sup>。

基于柔性路面和半柔性路面中 SMA 路面、半柔

性路面以及环氧沥青路面,同时考虑通过添加改性剂和外掺剂,能有效提高动稳定度,增加混合料的抗剪强度和高温稳定性,初步优化了 4 种面层结构方案,分别为 SMA+AC 路面方案、双层 SMA 路面方案、半柔性路面方案以及环氧沥青路面方案<sup>[3]</sup>。

路基段 BRT 路面结构见图 1。上面层和中面层方案见表 1。

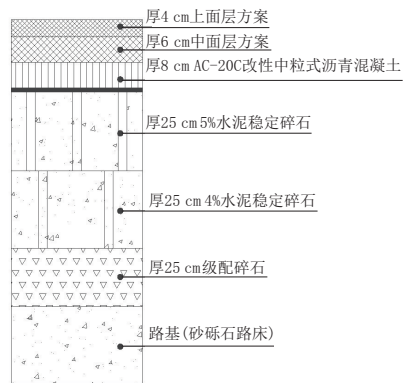


图 1 路基段 BRT 路面结构图

表 1 上面层和中面层方案表

方案	SMA+AC 路面方案	双层 SMA 路面方案	半柔性路面方案	环氧沥青路面方案
上面层	改性沥青 SMA-13	改性沥青 SMA-13	半柔性路面(SFCP-13)	细粒式环氧沥青(EA)
中面层	改性中粒式沥青 AC-20C	改性沥青 SMA-16	半柔性路面(SFCP-16)	改性中粒式沥青 AC-20C

## 2 建立有限元模型

### 2.1 基本假定和条件输入

有限单元法的基本思路是将连续的求解域离散为一组或多组单元的组合体,其近似函数用单元体中各个节点的函数插值推出,从而使连续的无限自由度问题转变为离散的有限自由度问题,并得到整个求解域的近似解。模型尺寸及荷载《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)采用双圆垂直(单轴-双轮组)均布荷载作用下的多层弹性层状连续体系进行路面结构设计。路面尺寸取为 4 m×4 m×10 m(宽×长×高),即 BRT 站点单车道路面整体宽度为 4 m,单轮接地当量圆直径 213.0 mm。轴载是造成车辙病害的一个重要因素,因此本次在数值分析时通过分级增加轴载的方式来分析不同轴重下的路面应力响应。根据比利时轴载与接地面积的经验关系分析模拟出最后的统计表<sup>[4]</sup>,见表 2、表 3。

表 2 轮胎接地压力与轴载对应表

轴载/kN	100	120	140
接地压力/MPa	0.71	0.76	0.81

### 2.2 建立 Abaqus 模型

以水泥稳定碎石基层沥青路面为例建立计算模

表 3 材料力学设计参数表<sup>[5]</sup>

材料名称	动态模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	备注
改性沥青 SMA-13	12 000	0.25	2 400	高黏度
改性中粒式沥青 AC-20C	10 000	0.25	2 400	
改性沥青 SMA-16	12 000	0.25	2 400	高黏度
半柔性路面(SFCP-13)	15 000	0.25	2 400	充填孔隙
半柔性路面(SFCP-16)	15 000	0.25	2 400	大于 20%
细粒式环氧沥青(EA)	35 000	0.20	2 400	
水泥稳定碎石	11 000	0.25	2 200	参量 4%~6%
级配碎石	220	0.35	1 850	
砂砾石	150	0.4	1 850	

型(见图 2),以单车道站点作为几何边界条件,选用三维直角坐标系,在数值分析过程中,对模型的网格划分处理,对车辆轮胎荷载作用位置进行加密处理。

采用 Abaqus 软件对沥青路面进行有限元分析<sup>[6]</sup>,以水泥稳定碎石基层的沥青路面为例,根据公路沥青路面设计规范设计控制指标和剪应力的要求,重点对沥青面层剪应力、沥青混合料层层底拉应变、下基层层底拉应力及路基顶压应变进行分析。

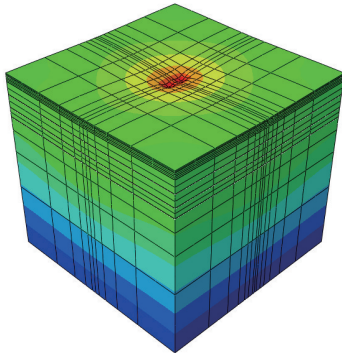


图2 Abaqus 计算模型图

### 3 力学响应分析

运用 Abaqus 有限元软件数值计算,对沥青路面各结构层的应力和各层的应变数值解进行整理分析。以沥青面层竖向正应力、沥青面层剪应力、沥青混合料层底拉应变、下基层层底拉应力以及路基顶压应变作为关键力学指标,全面评价不同轴载下的沥青路面的应力应变行为的变化特征。

#### 3.1 竖向正应力分析

通过 Abaqus 分析 4 种沥青路面结构表面竖向正应力,按照单侧双轮组依次分别选取单轮中心和车轮轮隙中心处,如图 3、图 4 中的 A、O、B 三点,在 4 种路面结构方案中沥青面层表面处,不同的轴重作用在单轮中心处的竖向正应力接近其换算对应的轮压值。

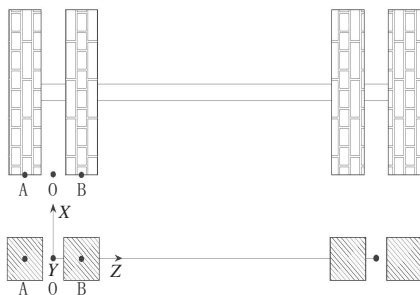


图3 正应力位置布置图

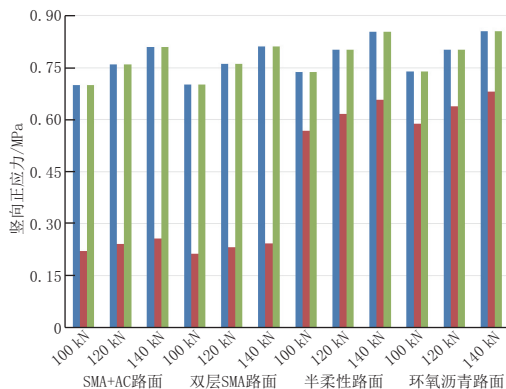


图4 面层竖向正应力统计图

从沥青路面不同层位竖向正应力统计(见图 5)可以看出,中面层沥青混凝土的竖向应力值大于上面层和下面层的竖向应力值,随着路面向下深度的逐渐增加,竖向应力逐渐减小。在 4 种沥青面层结构中,SMA+AC 路面结构的竖向应力变化递减较快,环氧沥青路面结构上面层与中面层的竖向应力差值最小。SMA+AC 路面、双层 SMA 路面、半柔性路面在半刚性基层顶竖向应力值差异不大,而环氧沥青路面的竖向应力值最小。4 种路面结构方案在垫层和土基处的竖向正应力基本一致。

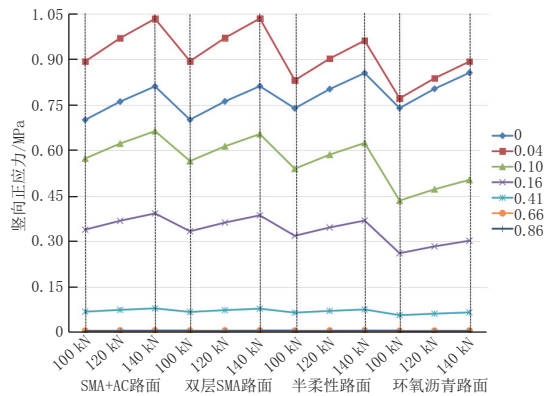


图5 沥青路面不同层位竖向正应力分析图

#### 3.2 沥青面层剪应力分析

对不同轴重下不同路面结构形式在路面表层的剪应力分析,由图 6 可以看出,产生剪力的主要 SMA+AC 路面、双层 SMA 路面和半柔性路面,三种路面结构形式的剪应力大小在 0.2 ~ 0.3 MPa 之间,且每种路面结构形式随着轴重的增加剪应力亦在增加,三种路面的剪应力增加幅度基本一致。环氧沥青路面的剪应力几乎等于零,轴载增大时剪应力变化亦不明显,没有直接的相关性,说明环氧沥青不同的轴重对其几乎不产生影响。

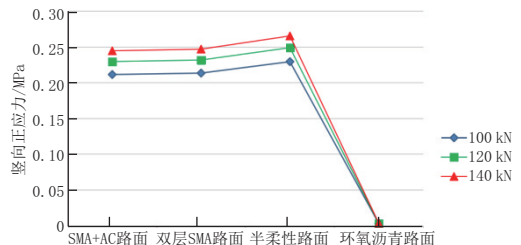


图6 剪力变化分析图

#### 3.3 沥青混合料层层底拉应变分析

对不同沥青路面面层结构的沥青混合料层层底拉应变数值进行提取并分析,见图 7。结果表明:对同一路面结构类型,随着轴重的增加,沥青混合料层层底拉应变也随之增大。轴重为 100 kN 下的 SMA+AC 路面拉应变比轴重为 140 kN 下的环氧沥青路面

的层底拉应变还要大,且是后者的 1.25 倍。

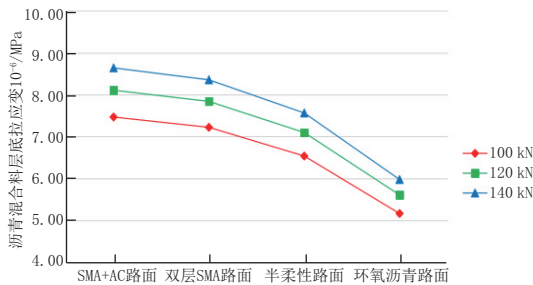


图 7 沥青混合料层底拉应变数据分析图

### 3.4 下基层层底拉应力分析

如图 8 对同一路面结构类型,随着轴重的增加,下基层层底拉应力也相应增加,且 4 种路面结构的变化幅度基本一致。同一轴重时,4 种路面结构下基层层底拉应力依次增大,变化趋势较为平缓,由此可以看出对于半刚性基层(水泥稳定碎石)沥青路面,在不同的沥青面层结构时,在水泥稳定碎石下基层层底拉应力变化不敏感。由上述分析可知,从数值分析角度说明半刚性基层是适用的。

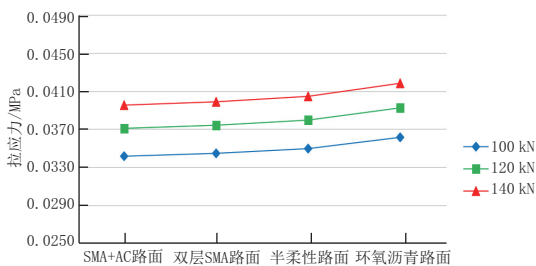


图 8 下基层层底拉应力数据统计分析图

### 3.5 路基顶压应变分析

根据图 9 分析,对同一路面结构类型,随着轴重的增加,路基顶压应变会相应增加,其中 SMA+AC 路面、双层 SMA 路面、半柔性路面三种路面结构的变换幅度基本一致,环氧沥青路面变幅相较前者较小。

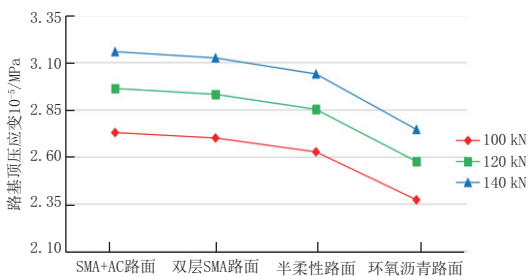


图 9 路基顶压应变数据统计分析图

对于同一轴重时,4 种路面结构路基顶压应变依次增大,前三种路面变化趋势较为平缓,环氧沥青路

面变幅较大,由此可以看出 SMA+AC 路面、双层 SMA 路面、半柔性路面对轴重增加比环氧沥青路面敏感。此外,由于环氧沥青路面的路基顶压应变也是最小的,且轴重为 140 kN 下的环氧沥青压应变与轴重为 100 kN 下的 SMA+AC 路面的压应变几乎是相等的,说明环氧沥青面层对路基顶压应变起到一定减缓作用<sup>[7]</sup>。

## 4 结 语

(1)通过 Abaqus 有限元软件分析 SMA+AC 路面、双层 SMA 路面、半柔性路面以及环氧沥青路面 4 种沥青路面结构的表面及不同层的位竖向正应力,获知在轮胎的中心点路面受到的竖向力最大,中面层沥青混凝土的竖向应力值大于上面层和下面层的竖向应力值。

(2)沥青混合料的层底拉应变,随着轴重的增加,拉应变也随之增大;轴重为 100 kN 时 SMA+AC 路面拉应变为轴重为 140 kN 下的环氧沥青路面的层底拉应变的 1.25 倍,表明环氧沥青路面抗应变能力大于其他三种路面结构,具有对大轴重的适应性。

(3)在下基层层底拉应力分析中,4 种路面结构在不同的轴重情况下,水泥稳定碎石下基层层底拉应力变化不敏感。

(4)对路基顶压应变分析中 4 种路面结构随轴重的增加应变随之增加,其中环氧沥青路面最小,变幅也是最小,表明环氧沥青面层对路基顶压应变起到一定减缓作用。

### 参考文献:

- [1] 朱玉琴. 半刚性基层沥青路面设计控制指标研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [2] 邹明均. 高模量沥青混凝土在 BRT 专用道路的应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [3] 张争奇, 张苛, 李志宏, 等. 环氧沥青混凝土增柔增韧改性技术[J]. 长安大学学报(自然科学报), 2015, 35(1): 1-7.
- [4] 黄文元. 沥青路面超重车轴载换算初步研究[J]. 公路交通科技, 2020, 17(1): 5-9.
- [5] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范[S].
- [6] 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, 2014.
- [7] 徐伟. 基于病害成因分析的 BRT 站点沥青路面结构组合优化与评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.