

# 高架快速路沥青桥面铺装结构力学分析

刘东亮<sup>1</sup>, 陈亚杰<sup>1</sup>, 徐弯弯<sup>1</sup>, 陈辉<sup>2</sup>, 吴少谦<sup>2</sup>

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092;2.上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

**摘要:**城市高架快速路沥青桥面铺装具有特殊的使用条件与受力变形特点,易导致剪切破坏、开裂、坑槽及修补、表面变形等病害。为了提升铺装结构安全和耐久性能,建立了高架快速路沥青桥面铺装的三维有限元模型,研究荷载、水平力、铺装层厚度与模量变化对桥面铺装力学响应的影响。研究表明:随荷载增大,铺装结构层内应力应变均线性增大,可能导致铺装层开裂、层底开裂、车辙等病害;水平力的增大会使铺装层剪应力大幅增大,易导致滑移和失稳性车辙;推荐桥面铺装沥青层厚度范围为6~10 cm;疲劳开裂、层间滑移是桥面铺装结构的主要病害,可采用表面拉应力和层间剪应力作为设计指标进行控制。

**关键词:** 沥青桥面铺装;有限元;力学响应

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)08-0241-04

## 0 引言

高架快速路沥青铺装不同于常规沥青路面,具有特殊的受力变形特点,长期使用中受荷载与自然因素影响,常产生剪切破坏、开裂、坑槽及修补、表面变形等病害<sup>[1-3]</sup>。

当前,许多研究人员建立了不同的桥面铺装结构数值仿真模型,用以研究层间界面、车辆荷载、路面不平度等因素对铺装层力学响应的影响。这些模型包括:考虑层间界面特性的桥面铺装简化模型<sup>[4]</sup>,包含车辆、橡胶轮胎以及铺装层-简支桥的有限元模型<sup>[5]</sup>,包含铺装层、粘结层、调平层、空心板及铰缝的数值模型等<sup>[6-8]</sup>。从已有研究可知,采用数值模拟方法对桥梁局部建模是行之有效的通用做法,可以真实地模拟桥面铺装受车辆荷载的作用<sup>[4,9]</sup>。

因此,本文针对高架快速路铺装层的结构特点,建立有限元分析模型,对桥面铺装体系进行数值模拟,分析铺装层界面处的剪应力和形变要求以及铺装层可承受的往复荷载或往复应变值,为日后同类结构设计和材料选择提供依据,提升铺装结构安全和耐久性能。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 结构与材料参数

有限元模型采用高架快速路的典型桥面铺装结

构,具体的结构与材料参数如表1所示。

表1 桥面铺装结构与材料参数

| 结构层    | 厚度/cm | 回弹模量/MPa | 泊松比  |
|--------|-------|----------|------|
| 沥青铺装上层 | 4     | 1 500    | 0.35 |
| 沥青铺装下层 | 4     | 1 200    | 0.35 |
| 钢纤维混凝土 | 8     | 35 000   | 0.15 |
| 素水泥混凝土 | 20    | 35 000   | 0.15 |

### 1.2 荷载模型

实际情况下,轮胎作用于铺装结构的形状和垂直压力相当复杂,相比弹性层状体系的圆形荷载,实测轮胎接地形状更接近矩形。因此,本文采用矩形的轮胎接地形状,间距采用34 cm,接地压力由Ikeda给出的经验关系式得到,如式1所示。考虑到我国交通量增长迅速,重载交通比例大,超载、超压现象十分普遍,是造成桥面早期破坏的主要原因之一,本文在100 kN标准荷载的基础上,分别考虑轴重为120、160、200 kN的荷载作用,如表2所示。

$$P=0.0021P'+0.29P_i+0.145 \quad (1)$$

式中: $P$ 为轮胎接地压力,MPa; $P'$ 为轴重,kN; $P_i$ 为轮胎内压,MPa。

### 1.3 确定最不利荷位与不利加载方式

本文分析不同荷载作用位置的桥面铺装层力学响应,发现桥面铺装的最不利荷位为纵桥向跨中边缘纵肋处。双轮荷载加载的控制点分两种:双轮中心或单一轮胎的中心。根据相关研究,这两种加载方式在轮胎附近的应力分布规律相似,应力最大值均发生在

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 浙江省住房和城乡建设厅项目(2020K130)

作者简介: 刘东亮(1996—),男,工学硕士,助理工程师,从事道路结构研究工作。

表2 不同荷载的轮印和轮压取值

| $P_i/\text{kN}$ | $P_i/\text{MPa}$ | $P/\text{MPa}$ | 间距/cm | 单轮轮宽 $a/\text{cm}$ | 单轮印高 $b/\text{cm}$ |
|-----------------|------------------|----------------|-------|--------------------|--------------------|
| 100             | 0.75             | 0.573          | 34    | 22                 | 20.0               |
| 120             | 0.8              | 0.63           | 34    | 22                 | 21.7               |
| 160             | 0.9              | 0.74           | 34    | 24                 | 22.5               |
| 200             | 1.0              | 0.855          | 34    | 24                 | 24.4               |

车轮附近<sup>[10]</sup>。

故本文以双轮中心为控制点,作用于最不利荷位,取横向4 m、纵向4 m的正方形范围为研究对象。

### 1.4 模型假设

本文应用有限元模型求解铺装层的应力、应变等指标时,引入如下假设<sup>[10]</sup>:

- (1)桥面铺装结构层与桥面板的层间接触状态为完全连续;
- (2)桥面铺装结构层与桥面板均为各向同性的均质弹性体;
- (3)忽略桥面铺装结构层与桥面板的自重。

## 2 高架快速路铺装结构力学分析

### 2.1 荷载大小

当前桥梁交通量越来越大,重载的比例也较高,因此分别计算荷载为120、160、200 kN时的桥面铺装层力学响应,包括铺装层表面的拉应力、各层的层底拉应变和层间剪应力变化,如图1和图2所示。

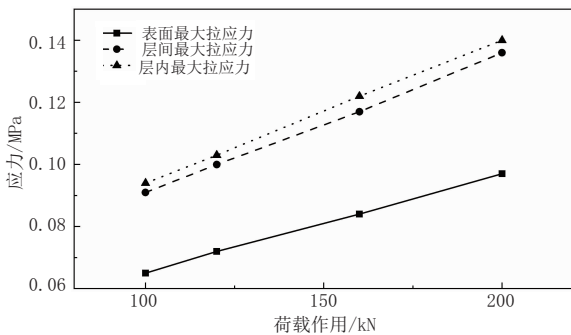


图1 拉应力和剪应力与荷载的关系曲线

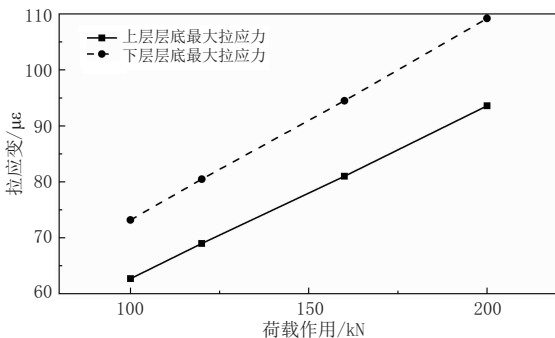


图2 拉应变与荷载的关系曲线

由图1和图2可知:

- (1)随着荷载增大,铺装层表面拉应力、各层的层底拉应变和层间剪应力均线性增大,在荷载为200 kN时,应力应变增大幅度达49%;
- (2)表面拉应力的增加,使铺装层表面开裂的可能性大大增加,而层底拉应变的增加,可能导致层底开裂;
- (3)层间剪应力的增加,使层间开裂的可能性增加,而层内最大剪应力的增加,可能导致沥青铺装层剪切流动变形,因此出现车辙的可能性也大大增加。

### 2.2 水平力作用

一般认为水平载荷  $T$  与垂直载荷  $P$  有一定的线性关系,可用水平力系数  $f$  来描述:  $T = fP$ 。一般情况下,缓慢制动时的水平力系数为0.2,紧急制动时为0.5。因此水平力系数  $f$  以0.1为间隔取0.1~0.5,分析其对层间剪应力与层内剪应力的影响,荷载采用标准荷载,计算结果如图3所示。

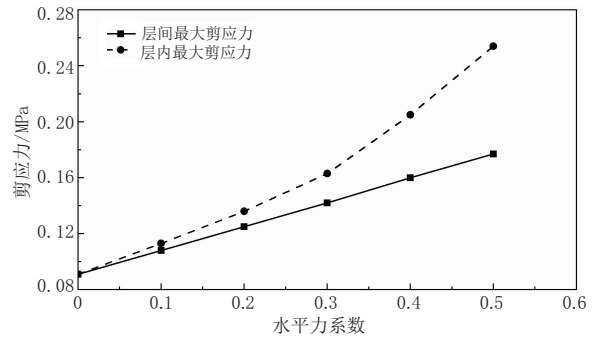


图3 剪应力与水平力的关系曲线

由图3可知:

- (1)在水平力作用下,层间剪应力线性增大,缓慢制动( $f=0.2$ )和紧急制动( $f=0.5$ )情况下,结构层间剪应力增长分别为37.4%和94.5%,易导致铺装层产生滑移;
- (2)失稳型车辙是目前高等级公路沥青路面永久变形的主要形式,剪切流动变形是失稳型车辙的主要发生机理,随水平力系数增大,层内最大剪应力加速增大,当水平力系数为0.5的时候,层内剪应力增加179.1%,铺装层出现车辙的可能性大大增加,因此在交叉口等车辆频繁启停段应进行针对性设计。

### 2.3 铺装层厚度

本节分析铺装层厚度变化对于铺装层结构力学响应的影响,将沥青铺装层上层与下层作为一层,考虑沥青铺装层为4、6、8、10、12 cm时的力学响应,包括铺装层整体厚度变化对铺装层表面拉应力、铺装

层层底拉应变、铺装层层底与层间剪应力的影响,计算结果如图4和图5所示。

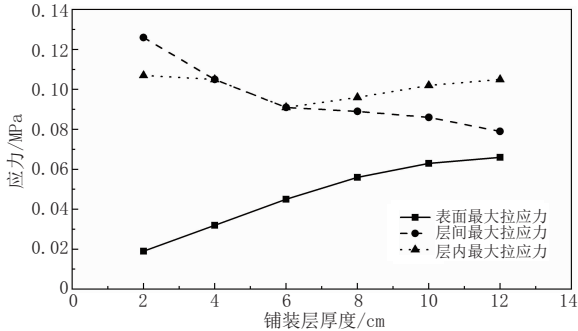


图4 拉应力和剪应力与铺装层厚度的关系曲线

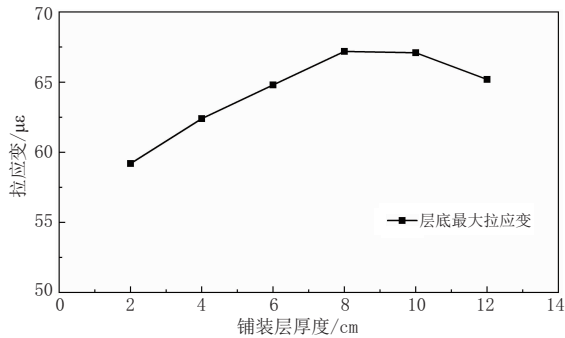


图5 拉应变与铺装层厚度的关系曲线

由图4和图5可知:

(1)随铺装层厚度增加,表面拉应力增大247.4%,层间剪应力减小37.3%,层底拉应变与层内剪应力变化不大;

(2)铺装层厚度超过8cm时,表面拉应力增加幅度降低,趋于稳定;铺装层厚度超过6cm时,层间剪应力减小幅度降低,趋于稳定。

因此结合工程实践,推荐桥面铺装沥青层厚度范围为6~10cm,特殊情况可适当增加。

### 2.4 铺装层模量

本节分析铺装层模量变化对于铺装层结构力学响应的影响,将沥青铺装层的上层与下层作为一层,分别考虑沥青铺装层整体模量为800、1200、1500、1800、2200MPa时的力学响应。主要考虑铺装层模量变化对铺装层表面拉应力、铺装层层底拉应变、铺装层层底与层内剪应力的影响,计算结果如图6和图7所示。

由图6和图7可知:

(1)随铺装层模量增加,表面拉应力增大321%,铺装层层底拉应变减小34.5%,而铺装层层底与层内剪应力变化不大;

(2)表面拉应力虽大幅增大,但在一般情况下,铺装层模量越大,抗拉强度也越大,因此对铺装层表面开裂病害的可能性需具体分析,层底拉应变的降

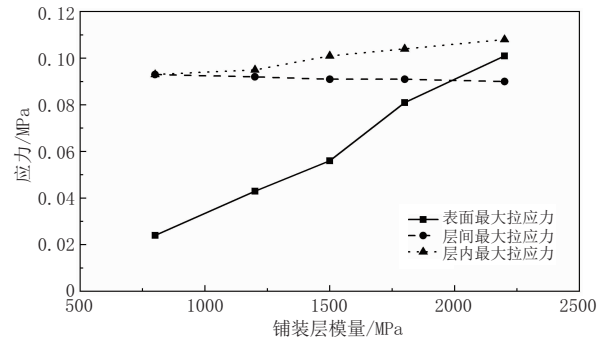


图6 拉应力和剪应力与铺装层模量的关系曲线

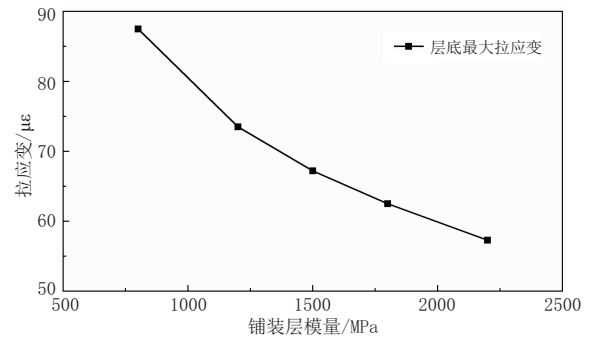


图7 拉应变与铺装层模量的关系曲线

低表明层底开裂的可能性降低。

## 3 高架快速路铺装结构设计方法分析

根据铺装结构力学计算结果,重载与水平力的作用会产生较大的表面拉应力与层间剪应力,易导致疲劳破坏与层间滑移破坏。为控制病害产生,本文分析提出相应设计指标。

### 3.1 疲劳开裂控制指标

桥面铺装层的疲劳开裂是桥面铺装的主要破坏类型,疲劳裂缝不仅影响铺装结构性能,还会为雨水侵蚀桥面板与钢筋提供路径,因此必须控制桥面铺装的疲劳开裂。桥面铺装层的疲劳开裂与路面自下而上的开裂不同,故层底拉应变的控制指标并不适用。桥面铺装层的疲劳开裂,是桥面板在刚度较高处的变形使铺装层产生较大的负弯矩与表面拉应力而导致的,因此这种疲劳开裂为自上而下,故桥面铺装层的表面拉应力可作为控制疲劳开裂破坏的设计指标。最大拉应力不得超过沥青铺装材料相应的容许值,如式2所示。

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma]_R = \frac{\sigma_s}{K_s} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{max}}$ 为桥面铺装层表面最大拉应力,MPa; $[\sigma]_R$ 为材料容许拉应力,MPa; $\sigma_s$ 为材料极限抗拉强度,MPa; $K_s$ 为抗拉强度结构系数,可采用 $0.09N_e^{0.15}/A_e$ 。

### 3.2 层间滑移控制指标

层间滑移破坏是桥面铺装的又一主要破坏类

型。在桥面铺装结构中,防水粘结层至关重要,它使桥面铺装与桥面板构成一体,共同经受交通荷载的反复作用,可使铺装结构层受到的应力与应变显著降低。当防水粘结层发生破坏时,铺装层与桥面板将整体受损,使结构受力情况发生变化,铺装结构层内应力增大,易引发开裂、车辙等破坏情况,并且层间滑移的修复需将破坏区域铲去重铺,费用消耗大又妨碍交通组织,因此必须严格控制粘结层的剪切破坏风险。根据力学分析结果,交通荷载与水平力的增大均会导致层间滑移破坏,因此可将桥面铺装层与桥面板的层间剪应力作为设计指标,最大剪应力不超过粘结层材料相应的容许抗剪强度,如式3所示。

$$\tau_{\max} \leq [\tau]_R = \frac{\tau_{\max}}{K_r} \quad (3)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为铺装层与桥面板的层间剪应力,MPa; $[\tau]_R$ 为容许层间剪应力,MPa; $\tau_{\max}$ 为材料层间抗剪强度,MPa; $K_r$ 为抗剪强度结构系数,可采用 $0.39N_p^{0.15}/A_c$ 。

#### 4 结 语

本文针对高架快速路沥青铺装层的结构特点,对桥面铺装体系进行数值模拟,分析了荷载、水平力、铺装层厚度与模量对铺装层力学响应的影响,得到主要结论如下:

(1)随荷载增大,表面拉应力、层底拉应变、层间剪应力和层内剪应力均线性增大,铺装层开裂、层底开裂及车辙等病害发生的可能性增大;

(2)在水平力作用下,层间剪应力、层内剪应力增加迅速,易导致桥面铺装层产生滑移和失稳性车

辙;

(3)随铺装层厚度增加,表面拉应力减速增大,层间剪应力减小;随铺装层模量增加,表面拉应力增大,层底拉应变减小,因此推荐桥面铺装沥青层厚度范围为6~10cm;

(4)可将铺装层表面拉应力作为设计指标,控制桥面铺装层的疲劳开裂;可将铺装层与桥面板的层间剪应力作为设计指标,控制桥面铺装层的层间滑移。

#### 参考文献:

- [1] 杨波,曹卫东,巩渭华,等.混凝土连续梁桥沥青铺装层病害调研与分析[J].中外公路,2022,42(6):109-112.
- [2] 韩劲甫.城市快速公交停靠站路面铺装病害调研与成因分析[J].上海公路,2022(3):20-23.
- [3] 陈攀,潘宝林.水泥混凝土桥面铺装结构设计方法[J].城市道桥与防洪,2012(7):177-179.
- [4] 邱文利,龚晓静,张少波,等.混凝土桥梁桥面铺装层间界面效应评估[J].公路,2022,67(12):20-27.
- [5] 郝艳广,袁龙文,韩劲龙,等.考虑非线性接触及车辆动载铺装层动力分析[J].科学技术与工程,2021,21(27):11796-11804.
- [6] 包龙生,樊乾玉,兰皓,等.基于层间接触的空心板梁及桥面铺装的双轴移动荷载下的力学响应分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(3):491-499.
- [7] 牛晓霞,李明国,梁东平.广东地区典型复合桥面铺装结构有限元分析[J].中外公路,2017,37(6):106-109.
- [8] 艾长发,张逸琳,AL-KAHTANI M S M等.BRT公交车制动状态下沥青铺面受力特征[J].西南交通大学学报,2017,52(4):685-693.
- [9] 蔡莉莉,张东,许缪鑫.典型沥青路面结构力学响应的有限元分析[J].现代交通技术,2023,20(1):23-26.
- [10] 李雪莲.系杆拱桥面铺装结构力学性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2005.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com