

doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.021

## 大厚度柔性基层长寿命沥青路面试验研究

谢恩连<sup>1</sup>, 聂忆华<sup>2\*</sup>, 黄新摇<sup>2</sup>, 谭波<sup>3</sup>, 宁鹏森<sup>2</sup>

(1. 广西田新高速公路有限公司, 广西 崇左 532800; 2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为研究大厚度柔性基层沥青路面结构内部力学行为特征及疲劳寿命,以田新高速试验段、主路面结构为原型,分别制作全厚度路面结构模型,开展同条件下沥青稳定碎石柔性基层和水泥稳定碎石半刚性基层沥青路面结构静力加载对比试验。采集不同轴载、温度工况下各层位力学响应值,进行变化规律拟合分析,并根据实际工况计算分析疲劳寿命。结果表明,同条件下,沥青稳定碎石柔性基层沥青路面结构下面层底、基层底的横向及纵向应变和竖向压应力指标均明显小于水泥稳定碎石半刚性基层沥青路面结构,且2种结构的下面层底各力学指标均大于其对应基层底指标;2种结构下面层、基层的疲劳寿命对数值随荷载等级增加呈线性下降,前者受温度变化影响更小,且数值均较后者明显提高;正常环境温度和标准交通荷载下,沥青稳定碎石柔性基层大厚度沥青路面结构下面层与基层预期可实现长寿命。研究结果为长寿命沥青路面结构提供新的试验途径与评定方法。

**关键词:**沥青路面;大厚度柔性基层;轮载试验;力学行为;疲劳寿命

中图分类号:U416.2

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0198-10

## Experimental Investigation of Large-thickness Flexible Base Long-life Asphalt Pavement

XIE Enlian<sup>1</sup>, NIE Yihua<sup>2\*</sup>, HUANG Xinyao<sup>2</sup>, TAN Bo<sup>3</sup>, NING Pengsen<sup>2</sup>

(1. Guangxi Tianxin Expressway Co., Ltd., Chongzuo 532800, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. College of Civil Engineering and Architectural, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to reveal the mechanical behavior characteristics and fatigue life of the structure of large-thickness flexible base asphalt pavement, full-thickness pavement structure models were created based on the prototypes of the test section of Tianxin Expressway and its main road structure, and a comparative test of static loading of asphalt pavement structures with asphalt-stabilized macadam flexible base and cement-stabilized macadam semi-rigid base under the same conditions was carried out. The mechanical response values of each layer under different shaft loads and temperature conditions were collected, the variation law fitting analysis was carried out, and the fatigue life was calculated and analyzed according to the actual working conditions. The analysis results showed that under the same conditions, for the asphalt-stabilized macadam flexible base asphalt pavement structure the lateral strain, longitudinal strain and vertical compressive stress indices of the bottom of the lower surface layer and base layer were significantly smaller than those of the cement-stabilized macadam semi-rigid base asphalt pavement structure. The mechanical indexes of the bottom of the lower surface layer of both structures were greater than those of corresponding the bottom of the base layer. The logarithmic values of the fatigue life of the lower surface layer and the base layer of the two structures decreased linearly with the increase of the load level, and the former was less affected by temperature changes, and the values were significantly higher than the latter. Under normal temperature conditions and traffic loading, the lower surface layer and base layer of the large-thickness asphalt pavement structure with asphalt-stabilized macadam flexible base were expected to achieve long service life. This study provides a new test method and analysis idea for evaluating the structure of long-life asphalt pavement.

**Keywords:** Asphalt pavement; thick flexible base; wheel loading test; mechanical behavior; fatigue life

收稿日期:2023-09-10

基金项目:广西交通运输行业重点科技项目(2022JJZK08);广西交通投资集团科研项目(2021TX003);湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ30259)。

第一作者简介:谢恩连,高级工程师。研究方向为道路工程结构与材料。E-mail:1101819511@qq.com

\*通信作者:聂忆华,博士,教授。研究方向为道路工程结构与材料。E-mail:nieyihua@hnust.edu.cn

引文格式:谢恩连,聂忆华,黄新摇,等.大厚度柔性基层长寿命沥青路面试验研究[J].森林工程,2024,40(2):198-207.

XIE E L, NIE Y H, HUANG X Y, et al. Experimental investigation of large-thickness flexible base long-life asphalt pavement [J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):198-207.

## 0 引言

沥青路面是一种路用性能优异并被广泛应用的高级路面类型,随着我国经济发展,提高沥青路面耐久性或使用寿命已成为我国道路领域的重要任务<sup>[1-3]</sup>。不同国家沥青路面结构的材料组成、设计标准及控制指标各有不同<sup>[4]</sup>,因此耐久性沥青路面典型结构各具特色。

国内学者开展了各类耐久性、长寿命沥青路面结构力学性能研究<sup>[5-7]</sup>,也铺筑了多条试验路段,取得了一定的研究成果,但整体上并未提出国内外公认的、统一的长寿命或耐久性沥青路面结构组成。沥青稳定碎石混合料(Asphalt-treated base, ATB)具有抗剪强度高、抗疲劳性能好和有效抑制反射裂缝等良好路用性能,研究普遍认为大粒径沥青混凝土柔性基层是实现耐久性或长寿命沥青路面结构性价比高的解决途径之一<sup>[8-12]</sup>。本研究基于广西大厚度柔性路面工程应用技术研究项目,以田新高速试验段、主路面结构为原型,同条件下开展大厚度柔性基层与半刚性基层沥青路面结构的力学行为研究,研究成果可为大厚度柔性基层沥青路面结构应用推广提供重要参考。

在沥青路面服役性能分析和结构力学计算中,路面结构内部应力、应变状态是关键的技术指标<sup>[13-14]</sup>。沥青路面结构力学响应试验目前主要有试验路、足尺试验、缩尺试验和室内试验等。试验路法研究实际路面结构在运营交通荷载作用下的

力学响应规律,如刘力源等<sup>[15]</sup>开展了服役 ATB 柔性基层沥青路面力学响应实测与分析;足尺试验法是一种大型科学试验,试验段在模拟实际路面加载条件下开展加速加载,如我国交通运输部公路科学研究院环道(RIOHTrack)自2016年开始了19种宽刚度域基层结构的足尺加速加载试验和数据采集<sup>[5,13]</sup>,但试验装置复杂、试验周期长和投入费用高;缩尺试验虽在一定程度上克服了足尺试验上述缺点,但无法如足尺试验获得真实的加载环境;相比之下,室内试验具有简单、经济、易控制和设备易获取等优点,被广泛应用<sup>[16]</sup>。本研究充分参考车辙试验仪的特点,设计制作能提供与实际沥青路面荷载和结构相近条件的室内轮载试验装备,结合数据采集设备和分析软件开展多层沥青路面结构室内加载试验,实现低成本、易操作和高效率的结构力学测试。该装备为各类路面结构今后开展力学性能评价提供新的室内模型试验途径。

## 1 加载试验

### 1.1 试验模型结构

本研究的依托工程为广西田新高速公路,选取该高速大厚度 ATB 柔性基层沥青路面试验段结构(后简称:ATB 基层结构)和水泥稳定碎石(Cement-treated base, CTB)半刚性基层沥青路面主体设计结构(后简称:CTB 基层结构),2种结构室内试验模型如图1所示。相关原材料及配合比均同依托工程 ATB 基层结构试验路段和 CTB 基层结构主体路段

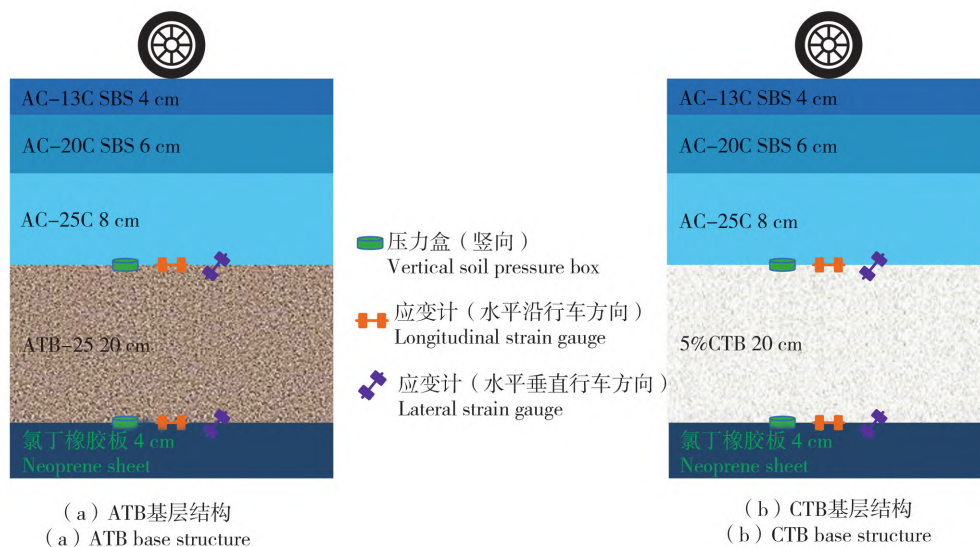


图1 室内试验模型及传感器布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of indoor test model and sensor layout

的施工材料。实体工程结构在路面基础上还铺筑了底基层和垫层,室内模型未包含;模型采用邵氏硬度 D75、厚度 4 cm 的氯丁橡胶层替代路面柔性基础;模型整体厚度为 42 cm,放置在测试设备刚性底板上。2 种结构除基层材料不同外,其余各层材料及厚度均相同;保证相同材料层同批制件、同条件测试与数据采集,确保对比测试结果的可靠性。

### 1.2 试验模型制作及数据采集

2 种结构分别在沥青下面层底即 AC-25C 底,以及基层底即 ATB-25 底或 5%CTB 底,在水平纵向

位置(沿行车方向)、水平横向位置(垂直于行车方向)埋入电阻式应变计、竖向位置埋入双膜土压力盒。沥青混凝土应变计为 HNY 型沥青埋入式电阻应变计,如图 2(a)所示,精度为  $0.1 \mu\epsilon$ ,工作温度范围为  $-30 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。水泥混凝土应变计型号为 HNY 型混凝土埋入式电阻应变计,如图 2(b)所示,精度为  $0.1 \mu\epsilon$ ,工作温度范围为  $-30 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。双膜土压力盒型号为 YWC,如图 2(c)所示,精度为  $0.1 \text{ kPa}$ ,工作温度范围为  $-35 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。数据采集仪为便携式动态信号分析系统,型号为 DH3822,如图 2(d)所示。

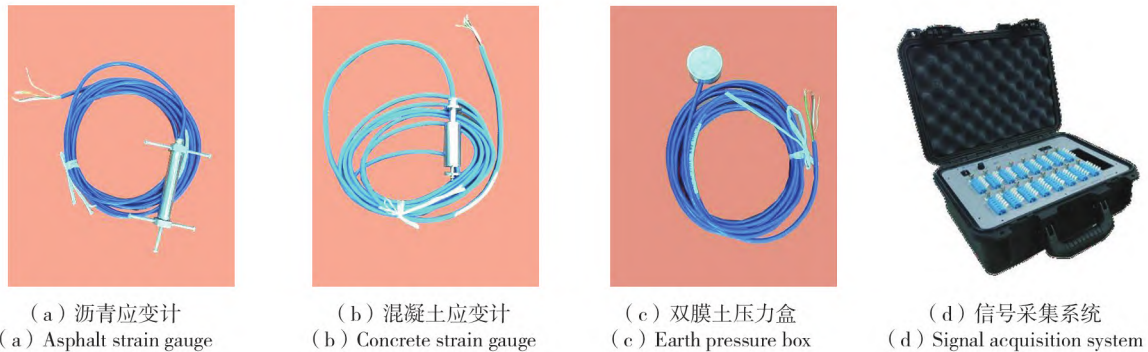


图2 传感器与信号采集系统

Fig. 2 Sensor and signal acquisition system

各层试件尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,均采用轮载试件成型仪碾压成型制作。成型厚度  $h \leq 10 \text{ cm}$  的试件采用一次成型,厚度大于  $10 \text{ cm}$  的试件则多次成型,如  $20 \text{ cm}$  的 ATB 或 CTB 分 2 层成型;各类型试件成型及养护参照各类材料相关规范要求进行。各层试件成型后,进行传感器埋设,然后采用改性乳化沥青将各层黏结成整体,用压力机施加约  $3 \text{ kN}$  的力,静压  $2 \text{ min}$  确保层间完全连续,待下层位的试件黏结稳定后再进行上层位的试件黏结,直至全部黏结完成,最后根据试验方案开展试验及数据采集

工作。传感器的埋设采用坑式埋设法,即根据设计要求确定好传感器安装位置后,在埋设处预埋一定尺寸的小木箱,待固结成型后取出。将传感器埋入坑内,ATB 层周围用 AC-13 沥青混合料回填(剔除大于  $1 \text{ cm}$  以上骨料)、CTB 层周围采用水泥砂浆回填,并人工分层振捣密实(埋入深度上距底面不低于  $1 \text{ cm}$ )。试件加载轮宽度  $5 \text{ cm}$ ,加载前通过测量轮压面积进行荷载等级标定。试件制作、加载及数据采集过程具体如图 3 所示。

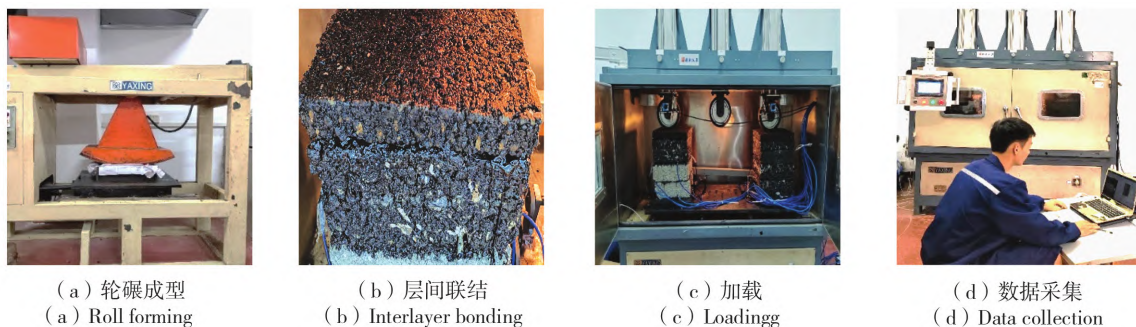


图3 试件制作、加载及数据采集过程

Fig. 3 Test piece fabrication, loading and data collection process

### 1.3 试验加载方案

本研究为静载试验,通过改变试验环境温度和静载荷载大小采集 2 种基层结构不同层位的应力应变响应值。试验条件如下。

加载设备为特制轮载试验机,如图 3(c)所示,试验荷载系统采用气动加载方式,荷载大小可在 0.5~10 kN 任意调节;试验前进行相应荷载标定,加载时荷载缓慢增加至规定值,确保无冲击。

环境温度选取 30 °C±2 °C(常温)、60 °C±2 °C(高温)。试件在选定环境温度下养护时间不低于 24 h,方可开展加载试验。

静载荷载采用 0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 MPa 共 5 个等级。

试验流程为先进行常温试验,后进行高温试验;依次进行 0.5~1.3 MPa 各等级的静载试验,试件在选定荷载等级下,加载静力稳定(约 1 min)后方可采集数据,各次荷载试验完成卸载应间隔 5 min 后再进行下一等级荷载试验。

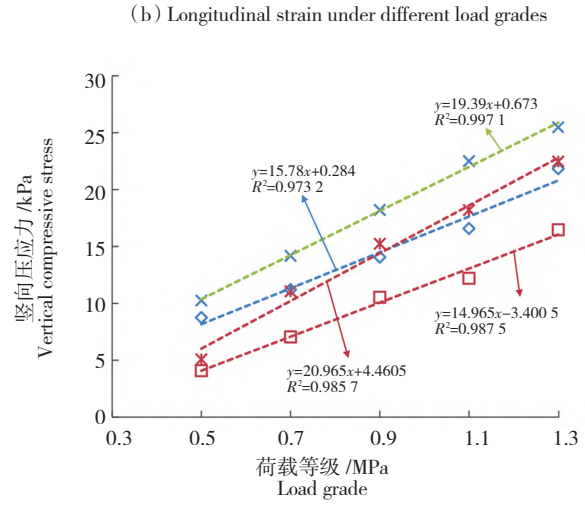
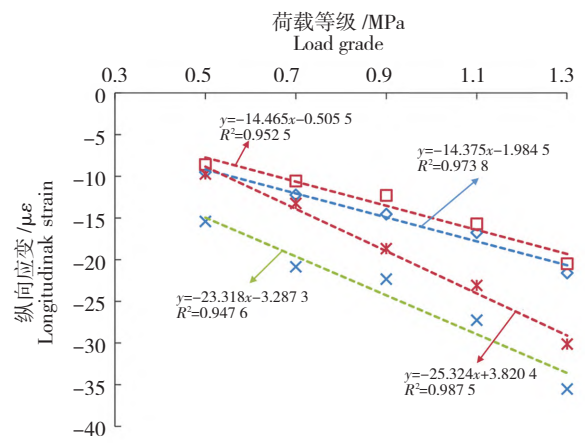
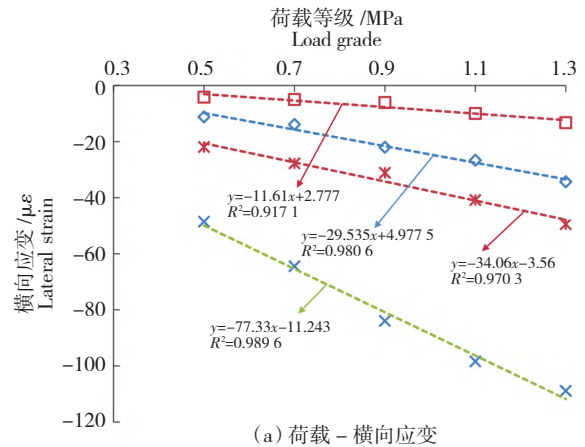
## 2 力学响应规律分析

### 2.1 不同荷载的力学响应规律

图 4 为 2 种结构在环境温度 30 °C 条件下,下面层底、基层底的横向应变(水平垂直于行车方向)、纵向应变(水平沿行车方向)和竖向压应力(竖向)随荷载等级变化的规律。全文受压为正值,受拉为负值。具体分析如下。

由图 4(a)可知,2 种结构的下面层底、基层底水平垂直于行车方向均为横向拉应变,且均随荷载等级的增加呈线性增加,拟合相关系数高,且 2 种结构基层底的横向拉应变均小于下面层底的相应值。所选 5 个轴载等级下,ATB 基层结构的下面层底、基层横向拉应变及其随荷载等级增加的速度均明显小于 CTB 基层结构。因此,ATB 基层结构相较于 CTB 基层结构,在下面层底和基层底的横向拉应变力学指标上更为安全和耐久。

由图 4(b)可知,2 种结构的下面层底、基层底水平沿行车方向均为纵向拉应变,均随荷载等级的增加呈线性增加,拟合相关系数高,且 2 种结构基层底的纵向拉应变均小于下面层底的拉应变。5 个轴载等级下,ATB 基层结构的下面层底、基层底拉应变及其增加速率均小于 CTB 基层结构,表明在纵向应变力学指标上前者更为安全和耐久。



(c) Vertical compressive stress under different load grades

- ◆ 下面层(ATB 基层结构) Bottom of ATB structure lower surface
- ATB 层底(ATB 基层结构) Bottom of ATB structure base layer
- × 下面层底(CTB 基层结构) Bottom of CTB structure lower surface
- × CTB 层底(CTB 基层结构) Bottom of CTB structure base layer

图 4 不同荷载下的力学响应规律(30 °C)

Fig. 4 Mechanical response rules under different loads (30 °C)

由图4(c)可知,2种结构的下面层底、基层底竖向压应力均随荷载等级的增加呈线性增加,拟合相关系数高,且2种结构基层底的竖向压应力均小于下面层底的相应值。所选5个轴载等级下,ATB基层结构的下面层底、基层竖向压应力及随荷载等级增加的速度均明显小于CTB基层结构。由此可知,ATB基层结构相较于CTB基层结构,在下面层底、基层底的竖向压应力力学指标上更为安全。

## 2.2 不同温度的力学响应规律

图5为2种结构在标准轴载0.7 MPa作用下的力学响应规律。下面层底、基层底的横向应变、纵向应变和竖向压应力随环境温度即30℃常温和60℃高温变化规律分析如下。

由图5(a)可知,30℃(常温)或60℃(高温)时,2种结构的下面层底、基层底水平垂直于行车方向均为横向拉应变,下面层底的横向拉应变值在高温环境下明显高于常温环境下,基层底的横向拉应变值在高温环境下略高于常温环境下,表明不同层位的横向拉应变随温度变化幅度不同。无论常温和高温,ATB基层结构的下面层底、基层底的横向拉应变值均显著小于CTB基层结构,表明前者在横向应变力学指标上更为安全和耐久。

由图5(b)可知,30℃(常温)或60℃(高温)时,2种结构的下面层底、基层底水平沿行车方向均为纵向拉应变,各点数值在高温下明显大于常温下。无论常温和高温,ATB基层结构的下面层底、基层底的纵向应变均明显小于CTB基层结构,表明前者在纵向应变力学指标上更为安全和耐久。

由图5(c)可知,30℃(常温)或60℃(高温)时,2种结构的下面层底竖向压应力值在高温下均低于常温下。无论常温和高温,ATB基层结构的下面层底、基层底的竖向应力值均明显小于CTB基层结构,表明在竖向压应力力学指标上前者更为安全。

## 2.3 不同层位的力学响应规律

图6为在标准轴载0.7 MPa作用下,30℃(常温)或60℃(高温)时,2种结构下面层底、基层底的横向应变、纵向应变、竖向压应力随层位变化的规律,分析如下。

由图6(a)可知,2种结构下面层底、基层底的水平垂直于行车方向均为横向拉应变,表明下面层底、基层底均易产生横向拉应变疲劳开裂。ATB基层结构与CTB基层结构下面层底的横向拉应变值均明显大于其基层底。在常温或高温下,ATB基层结构下面层底、基层底的横向拉应变均显著小于CTB基层结构,表明在横向应变力学指标上前者更为安全和耐久。

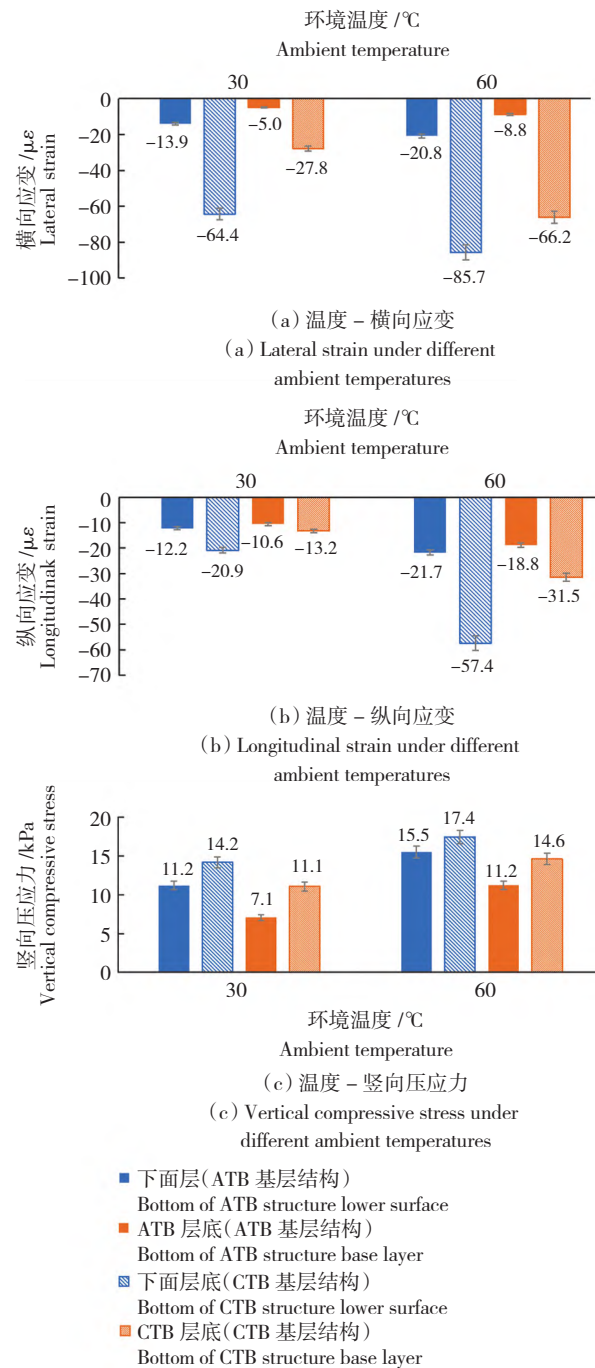


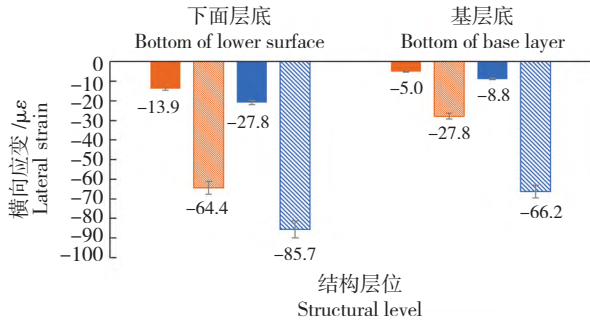
图5 不同温度下的力学响应规律(0.7 MPa)

Fig. 5 Mechanical response rules at different temperatures (0.7 MPa)

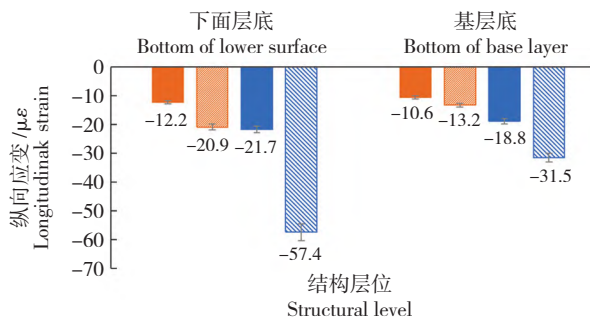
由图6(b)可知,2种结构的下面层底、基层底水平沿行车方向均为纵向拉应变,表明下面层底、基层底均易产生纵向拉应变疲劳开裂,在相同温度环境下,下面层底的纵向拉应变大于基层底的纵向拉应变。在常温和高温下,ATB基层结构下面层底、基层底的纵向拉应变均明显小于CTB基层结构,表明在纵向应变力学指标上前者更为安全和

耐久。

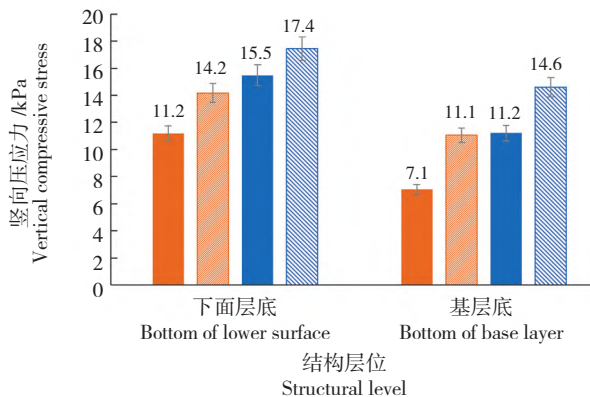
由图 6(c)可知,在相同环境温度下 2 种结构下面层底的竖向压应力值均大于基层底,ATB 基层结构下面层底、基层底的竖向压应力均明显小于 CTB 基层结构,表明在竖向压应力力学指标上前者更为安全。



(a) 层位 - 横向应变  
(a) Lateral strain under different structural levels



(b) 层位 - 纵向应变  
(b) Longitudinal strain under different structural levels



(c) 层位 - 竖向压应力  
(c) Vertical compressive stress under different structural levels

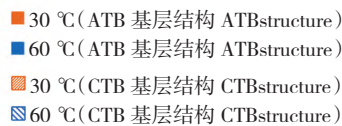


图 6 不同层位的力学响应规律 (0.7 MPa)

Fig. 6 Mechanical response rules of different layers (0.7 MPa)

### 3 疲劳寿命计算分析

#### 3.1 疲劳方程

吕松涛等<sup>[17]</sup>提出目前国内外沥青路面设计方法大都是基于材料与结构的疲劳特性而建立的,沥青混合料疲劳性能表征的不确定性与不客观性问题严重影响了沥青路面的耐久性与可靠性,沥青路面处于三维应力应变状态,沥青混合料疲劳性能表征方程大多来源于一维或二维应力状态下的疲劳试验,并未全面考虑应力、应变张量的各分量共同作用所产生的疲劳效应,有失客观。本研究试验模型源于真实路面结构、荷载及环境温度,在三维应力状态开展试验和采集数据,根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)<sup>[18]</sup>中疲劳寿命计算公式,对采集应变数据开展疲劳分析。

沥青混合料层的疲劳开裂寿命按公式(1)计算。

$$N_{f1} = 6.32 \times 10^{15.96 - 0.29\beta} k_a k_b k_{T1}^{-1} \left(\frac{1}{\sigma_a}\right)^{3.97} \left(\frac{1}{\varepsilon_a}\right)^{1.58} (V_{FA})^{2.72} \quad (1)$$

式中:  $N_{f1}$  为沥青混合料的疲劳开裂寿命,轴次;  $\beta$  为目标可靠度指标;  $k_a$  为季节性冻土地区调整系数;  $k_b$  为疲劳加载模式系数;  $E_a$  为沥青混合料 20 °C 的动态压缩模量,MPa;  $V_{FA}$  为沥青混合料饱和度,%;  $k_{T1}$  为温度调整系数;  $\varepsilon_a$  为沥青混合料层底拉应变 ( $10^{-6}$ )。

无机结合料层的疲劳开裂寿命按公式(2)计算。

$$N_{f2} = k_a k_{T2}^{-1} \times 10^{a - b \frac{\sigma_1}{R_s} + k_c - 0.57\beta} \quad (2)$$

式中:  $N_{f2}$  为无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命,轴次;  $k_a$  为季节性冻土地区调整系数;  $k_{T2}$  为温度调整系数;  $R_s$  为无机结合料稳定料弯拉强度,MPa;  $a$ 、 $b$  为疲劳试验回归系数;  $k_c$  为现场综合修正系数;  $\beta$  为目标可靠度指标;  $\sigma_1$  为无机结合料稳定层层底拉应力,MPa。

#### 3.2 疲劳寿命

根据田新高速公路的工况参数,结合室内试验得到的层底拉应变值,沥青混凝土层采用式(1)、半刚性基层采用式(2),分别计算得到相应的疲劳寿命值。图 7 为常温、高温下计算得到的疲劳寿命对数值随荷载等级变化规律。由图 7 分析可知,2 种结构在 30 °C (常温)或 60 °C (高温)时,下面层、基层的疲劳寿命对数值均随荷载等级增加呈线性下降,符合材料疲劳变化规律。

由图7(a)可知,ATB基层结构下面层在常温与高温下的疲劳寿命差值接近于CTB基层结构的对应差值(约5倍),表明2种结构在高温下的下面层疲劳寿命下降幅度接近。在相同温度以及荷载等级下,ATB基层结构下面层疲劳寿命明显大于CTB基层结构。

由图7(b)可知,2种结构常温下的疲劳寿命值

均高于高温下的相应值,ATB基层结构基层在常温与高温下的疲劳寿命差值(约10倍)明显小于CTB基层结构的对应差值(大于100倍),表明CTB基层结构在高温下的基层疲劳寿命下降幅度大。在相同温度以及相同荷载等级下,ATB基层结构基层的疲劳寿命显著大于CTB基层结构。

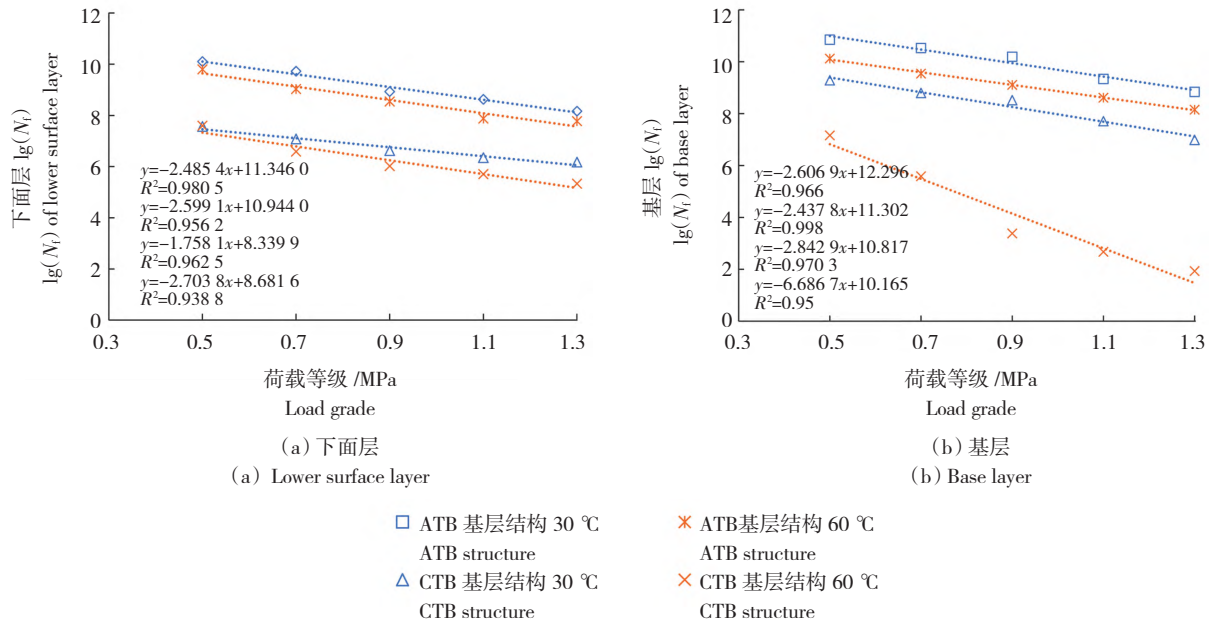


图7 层底拉应变破坏对应的疲劳寿命

Fig. 7 Fatigue life corresponding to tensile strain failure at the bottom of the layer

### 3.3 长寿命判定

根据田新高速公路的工况参数,试验测试得到的层底拉应变值,沥青混凝土层采用式(1)、半刚性基层采用式(2),计算得到相应层位的疲劳寿命值,见表1和表2。

文献[7]和[19]提出对于全柔式长寿命沥青路面(设计寿命 $\geq 40$  a)的热拌沥青混合料(Hot Mixture Asphalt, HMA)疲劳极限确定的应变保守取值 $65 \mu\epsilon$ ,室内极限轴载作用次数保守估计值500百万次,室外极限轴载作用次数保守估计值500百万次。为判定是否为长寿命结构,对于2种结构,沥青混凝土层采用疲劳极限确定应变保守取值 $65 \mu\epsilon$ ,各层疲劳寿命保守取值500百万次作为长寿命判定指标,两者同时满足可判定为长寿命层位,具体判定结果见表1和表2。

由表1可知,对于ATB基层结构,在常温 and 高温下5个荷载等级中,常温下荷载等级为0.5、0.7、

0.9 MPa时,高温下荷载等级为0.5、0.7 MPa时,下面层可判定为长寿命层位;常温或高温下荷载等级为0.5、0.7、0.9 MPa时,ATB基层可判定为长寿命层位;综合可得常温下荷载等级为0.5、0.7、0.9 MPa时,高温下荷载等级为0.5 MPa和0.7 MPa时,下面层、基层均判定为长寿命层位。

由表2可知,对于CTB基层结构,在常温 and 高温下5个荷载等级中除了常温、荷载等级为0.5 MPa和0.7 MPa时,仅基层可判定为长寿命层位外,其他条件下的下面层、基层均不能判定为长寿命层位。

综上所述,本研究所选取的ATB基层结构(下面层+基层),常温或高温下不高于标准轴载0.7 MPa情况下,由实测数据估算的疲劳寿命能判定为长寿命结构,而常规CTB基层结构(下面层+基层)不能判定为长寿命结构。试验与计算分析表明本研究所选用的ATB基层大厚度沥青路面结构(38 cm)可实现长寿命( $\geq 40$  a)。

表1 ATB 基层结构疲劳寿命计算值及长寿命结构判定汇总  
 Tab. 1 Summary of fatigue life calculation values and long-life structure  
 determination of ATB base structure

层位 Surface level	试验温度/℃ Test temp.	荷载等级/MPa Load grade	实测纵向应变/ $\mu\epsilon$ Longitudinal strain	实测横向应变/ $\mu\epsilon$ Lateral strain	判定应变是否 $\leq 65 \mu\epsilon$ Strain $\leq 65 \mu\epsilon$ judgement	计算疲劳寿命 $N_f$ /次 Calculated fatigue life $N_f$	判定是否 $N_f \geq 500 \times 10^6$ /次 $N_f \geq 500 \times 10^6$ times judgement	判定是否长寿命结构 Long life structure judgement
下面层 Lower surface layer	30	0.5	-9.5	-11.2	是	$1.26 \times 10^{10}$	是	是
下面层 Lower surface layer	30	0.7	-11.2	-13.9	是	$5.31 \times 10^9$	是	是
下面层 Lower surface layer	30	0.9	-14.5	-22.0	是	$8.50 \times 10^8$	是	是
下面层 Lower surface layer	30	1.1	-16.8	-26.7	是	$4.23 \times 10^8$	否	否
下面层 Lower surface layer	30	1.3	-21.6	-34.3	是	$1.46 \times 10^8$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	0.5	-12.7	-13.3	是	$6.29 \times 10^9$	是	是
下面层 Lower surface layer	60	0.7	-21.7	-20.8	是	$1.07 \times 10^9$	是	是
下面层 Lower surface layer	60	0.9	-30.4	-27.6	是	$3.49 \times 10^8$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	1.1	-42.9	-40.5	是	$7.55 \times 10^7$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	1.3	-56.7	-43.0	是	$5.96 \times 10^7$	否	否
ATB层 ATB layer	30	0.5	-8.6	-4.1	是	$7.09 \times 10^{10}$	是	是
ATB层 ATB layer	30	0.7	-10.6	-5.0	是	$3.37 \times 10^{10}$	是	是
ATB层 ATB layer	30	0.9	-12.3	-6.1	是	$1.56 \times 10^{10}$	是	是
ATB层 ATB layer	30	1.1	-15.7	-9.9	是	$2.17 \times 10^9$	是	是
ATB层 ATB layer	30	1.3	-20.5	-13.3	是	$6.91 \times 10^8$	是	是
ATB层 ATB layer	60	0.5	-17.2	-6.3	是	$1.33 \times 10^{10}$	是	是
ATB层 ATB layer	60	0.7	-18.8	-8.8	是	$3.50 \times 10^9$	是	是
ATB层 ATB layer	60	0.9	-24.7	-11.4	是	$1.28 \times 10^9$	是	是
ATB层 ATB layer	60	1.1	-29.3	-15.1	是	$4.10 \times 10^8$	否	否
ATB层 ATB layer	60	1.3	-34.0	-19.8	是	$1.42 \times 10^8$	否	否

表 2 CTB 基层结构疲劳寿命计算值及长寿命结构判定汇总  
 Tab. 2 Summary of fatigue life calculation values and long-life structure determination of CTB base structure

层位 Surface level	试验温 度/°C Test temp.	荷载等 级/MPa Load grade	实测纵向 应变/ $\mu\epsilon$ Longitudinal strain	实测横向 应变/ $\mu\epsilon$ Lateral strain	判定应变是 否 $\leq 65 \mu\epsilon$ Strain $\leq 65 \mu\epsilon$ judgement	计算疲劳寿命 $N_f$ /次 Calculated fatigue life $N_f$	判定是否 $N_f \geq 500 \times 10^6$ /次 $N_f \geq 500 \times 10^6$ times judgement	判定是否长 寿命结构 Long life structure judgement
下面层 Lower surface layer	30	0.5	-15.4	-48.5	是	$3.7 \times 10^7$	否	否
下面层 Lower surface layer	30	0.7	-20.9	-64.4	是	$1.2 \times 10^7$	否	否
下面层 Lower surface layer	30	0.9	-22.3	-84.0	否	$4.2 \times 10^6$	否	否
下面层 Lower surface layer	30	1.1	-27.3	-98.4	否	$2.2 \times 10^6$	否	否
下面层 Lower surface layer	30	1.3	-35.5	-108.9	否	$1.5 \times 10^6$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	0.5	-46.7	-47.7	是	$3.94 \times 10^7$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	0.7	-57.4	-85.7	否	$3.86 \times 10^6$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	0.9	-70.2	-118.9	否	$1.05 \times 10^6$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	1.1	-82.5	-142.9	否	$5.07 \times 10^5$	否	否
下面层 Lower surface layer	60	1.3	-87.6	-177.3	否	$2.15 \times 10^5$	否	否
CTB 层 CTB layer	30	0.5	-9.7	-21.9	-	$1.9 \times 10^9$	是	是
CTB 层 CTB layer	30	0.7	-13.2	-27.8	-	$6.3 \times 10^8$	是	是
CTB 层 CTB layer	30	0.9	-18.7	-31.1	-	$3.3 \times 10^8$	否	否
CTB 层 CTB layer	30	1.1	-23.1	-40.8	-	$5.1 \times 10^7$	否	否
CTB 层 CTB layer	30	1.3	-30.1	-49.5	-	$9.7 \times 10^6$	否	否
CTB 层 CTB layer	60	0.5	-18.5	-47.4	-	$1.45 \times 10^7$	否	否
CTB 层 CTB layer	60	0.7	-31.5	-66.2	-	$3.86 \times 10^5$	否	否
CTB 层 CTB layer	60	0.9	-40.7	-92.7	-	$2.40 \times 10^3$	否	否
CTB 层 CTB layer	60	1.1	-50.5	-101.1	-	$4.71 \times 10^2$	否	否
CTB 层 CTB layer	60	1.3	-61.4	-110.0	-	$8.54 \times 10$	否	否

#### 4 结论

ATB 基层结构和 CTB 基层结构静力加载对比试验研究结论如下。

1) 在常温下, 2 种结构下面层底、基层底的横向

及纵向应变和竖向压应力等 3 个指标均随荷载等级的增加呈线性增加, 拟合相关系数高, 且下面层底的力学指标均大于基层底的力学指标; ATB 基层结构的 3 个力学值及其随荷载等级增加速度均明显小于 CTB 基层结构, 力学上更为安全。

2)在标准轴载作用下,2种结构在常温或高温下的下面层底、基层底的横向、纵向均为拉应变;无论常温和高温下,ATB基层结构下面层底、基层底的横向应变、纵向应变、竖向压应力等3个力学值均明显小于CTB基层结构,力学上更为安全。

3)在常温或高温下,2种结构的疲劳寿命对数值均随荷载等级增加呈线性下降,常温下疲劳寿命均大于高温下,符合材料疲劳变化规律;ATB基层结构下面层、基层的疲劳寿命受温度变化影响小,数值均明显大于CTB基层结构。

(4)30℃下荷载等级为0.5、0.7、0.9 MPa时,60℃下荷载等级为0.5 MPa和0.7 MPa时,本研究选用的ATB基层大厚度沥青路面结构(38 cm)的下面层、基层预期可实现长寿命(疲劳极限应变 $\leq 65 \mu\epsilon$ ,疲劳寿命 $\geq 500$ 百万次)。

本研究初步探讨ATB柔性基层大厚度沥青路面结构静力响应规律及疲劳寿命优越性,但由于仅针对2种对比结构,相关结论是否适合于不同厚度和材料等结构组合还待进一步研究,动力学响应、疲劳试验和工程试验段监测分析是本研究持续开展的重点。

### 【参 考 文 献】

- [1] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227.  
ZHENG J L, LYU S T, LIU C C. Technical system, key scientific problems and technical frontier of long-life pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3219-3227.
- [2] 王立军,陈帅,王浩,等.加载间歇时间对沥青混合料疲劳性能影响研究[J].公路工程,2023,48(5):123-130,140.  
WANG L J, CHEN S, WANG H, et al. Effect of loading time on fatigue performance of asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2023, 48(5): 123-130, 140.
- [3] 吴石,李怡鹏.轮毂电机不平衡电磁力对车辆垂向振动影响的分析[J].哈尔滨理工大学学报,2022,27(2):21-28.  
WU S, LI Y P. Analysis of the influence of the unbalanced electromagnetic force of the in-wheel motor on the vertical vibration of the vehicle[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(2): 21-28.
- [4] 沈金安.国外沥青路面设计方法总汇[M].北京:人民交通出版社,2004.  
SHEN J A. Summary of foreign asphalt pavement design methods[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [5] 张蕾,周兴业,王旭东.基于RIOHTrack足尺加速加载试验的长寿命沥青路面行为研究进展[J].科学通报,2020,65(30):3247-3258.  
ZHANG L, ZHOU X Y, WANG X D. Research progress of long-life asphalt pavement behavior based on the RIOHTrack full-scale accelerated loading test [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3247-3258.
- [6] 徐鸥明.长寿命沥青路面设计指标与设计方法研究[D].西安:长安大学,2008.  
XU O M. Study on the design index and method of long life asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [7] 聂忆华.全柔式长寿命沥青路面(FF-LLAP)结构及其设计方法研究[D].长沙:中南大学,2008.  
NIE Y H. Study for structures and design methods of full flexible long life asphalt pavement (FF-LLAP) [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [8] 王松根,房建果,王林,等.大碎石沥青混合料柔性基层在路面补强中的应用研究[J].中国公路学报,2004,17(3):10-15.  
WANG S G, FANG J G, WANG L, et al. Study of the use of large-stone asphalt mixes in the flexible base courses to reinforce pavements [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 10-15.
- [9] 徐乐,刘路,邵成龙.沥青碎石路面ATB-25施工技术研究[J].公路,2020,65(6):112-117.  
XU L, LIU L, SHAO C L. Research on construction technology of asphalt macadam ATB-25 [J]. Highway, 2020, 65(6): 112-117.
- [10] 张韶华.ATB-30沥青混合料配合比设计与力学性能研究[D].西安:长安大学,2015.  
ZHANG S H. Study on mix design and mechanics performance of ATB-30 asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [11] LI P, LIU J Y, ZHAO S. Implementation of stress-dependent resilient modulus of asphalt-treated base for flexible pavement design [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(5): 439-446.
- [12] ZHU F, HAN J B, ZHANG S A, et al. A new method for the aggregate proportion calculation and gradation optimization of asphalt-treated base (ATB-25) [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(4): 1-9.
- [13] 王旭东,周兴业,关伟,等.沥青路面结构内部的力学响应特征及分析[J].科学通报,2020,65(30):3298-3307.  
WANG X D, ZHOU X Y, GUAN W, et al. Characteristics and analysis of the mechanical response inside the structure of asphalt pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3298-3307.

(下转第216页)

- [14] 马峰,袁康博,傅珍,等.不同温拌剂对沥青混合料路用性能的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(11):1500-1505.  
MA F, YUAN K B, FU Z, et al. Effects of different warm mix agents on road performance of asphalt mixture[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(11): 1500-1505.
- [15] 周燕,陈拴发,郑木莲,等.温拌沥青混合料拌合压实特性研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(1):61-64.  
ZHOU Y, CHEN S F, ZHENG M L, et al. Research on mixing and compaction property of warm mix asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(1): 61-64.
- [16] WANG W H, HUANG C W. Establishing indicators and an analytic method for moisture susceptibility and rutting resistance evaluation using a hamburg wheel tracking test[J]. Materials, 2020, 13(15): 3269.
- [17] 齐琳,沙爱民,陈凯.沥青混合料水稳定性汉堡车辙试验研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(8):42-45.  
QI L, SHA A M, CHEN K. Research on the water stability of asphalt mixtures based on the HWT D[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(8): 42-45.
- [18] BATIOJA-ALVAREZ D, LEE J S, RAHBAR-RASTEGAR R, et al. Asphalt mixture quality acceptance using the hamburg wheel-tracking test[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(8): 338-349.
- [19] AREFIN M S, QUASEM T, NAZZAL M, et al. Effect of short-term and long-term ageing on dynamic modulus of foamed warm mix asphalt[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(4): 524-536.
- [20] 薛羽,栗培龙,高朋,等.沥青混合料动态模量主曲线方法对比分析[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(1):1-9.  
XUE Y, LI P L, GAO P, et al. Comparative analysis of principal curve methods of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45(1): 1-9.
- [21] 杨小龙,申爱琴,郭寅川,等.沥青混合料动态模量预估模型研究进展[J].材料导报,2018,32(13):2230-2240.  
YANG X L, SHEN A Q, GUO Y C, et al. A review of dynamic modulus prediction model of asphalt mixture[J]. Materials Review, 2018, 32(13): 2230-2240.

(上接第 207 页)

- [14] HATOUM A A, KHATIB J M, BARRAJ F, et al. Survival analysis for asphalt pavement performance and assessment of various factors affecting fatigue cracking based on LTPP data[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12408.
- [15] 刘力源,程怀磊,张翥,等.服役柔性基层沥青路面力学响应实测与分析[J].公路交通科技,2022,39(4):11-21,40.  
LIU L Y, CHENG H L, ZHANG X, et al. Field measurement and analysis on mechanical response of asphalt pavement with flexible base course in service[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(4): 11-21, 40.
- [16] 沈士蕙,张志栋.一种基于车辙试验仪的沥青混合料疲劳性能测试方法:CN110501243A[P].2022-04-05.  
SHEN S H, ZHANG Z D. Asphalt mixture fatigue performance test method based on rutting tester: CN110501243A[P]. 2022-04-05.
- [17] 吕松涛,刘超超,屈芳婷,等.沥青混合料疲劳性能试验与表征方法综述[J].中国公路学报,2020,33(10):67-75.  
LÜ S T, LIU C C, QU F T, et al. Test methods and characterization of fatigue performance of asphalt mixtures: A review[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2020, 33(10): 67-75.
- [18] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社,2017.  
Ministry of Transport of The People's Republic of China. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [19] 聂忆华,张起森.HMA 疲劳极限存在性及其确定方法研究[J].中外公路,2007,27(5):191-194.  
NIE Y H, ZHANG Q S. Study on the existence of HMA fatigue limit and its determination method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(5): 191-194.