

轴载对广西大厚度柔性路面结构的力学响应规律分析

谢恩连^{1*}, 聂忆华², 谭波³, 黄新摇², 于国庆¹, 李钰涛¹

¹广西田新高速公路有限公司, 广西 崇左

²湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

³桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年10月16日; 录用日期: 2023年11月22日; 发布日期: 2023年11月30日

摘要

为了研究广西大厚度柔性路面耐久性结构, 本文依托田新高速公路项目的设计参数与交通条件, 提出了一种广西大厚度柔性路面试验段结构。采用离散元软件进行了5种不同轴载下的力学响应规律及设计参数变化规律研究, 为广西大厚度柔性沥青路面结构的应用推广提供重要参考。研究发现, 对于所选大厚度柔性沥青路面结构的双圆荷载中心点处: 随着深度的增加, 各层顶部的竖向位移慢慢减小, 但各层顶竖向位移、沿行车方向水平拉应力与压应变均随轴载的增加呈线性关系增加; 拉应力增速路表 > 路基顶, 压应力增速路表 > 中面层顶 > 下面层顶 > 基层顶 > 路基顶; 拉应变增速路基顶 > 底基层顶 > 基层顶 > 下面层顶, 压应变增速由大到小为路表 > 中面层顶; 设计年限内车辙累计深度随轴载的增加呈线性增加, 增速为8.585, 超载易超过现有设计规范的车辙限值; 沥青层疲劳开裂对应的累计当量轴载次数随轴载的增加呈指数减少, 大厚度柔性路面结构沥青层疲劳寿命长, 超载下也远高于常规沥青路面结构。

关键词

大厚度柔性路面结构, 轴载, 力学响应, 麦路软件

Analysis of Mechanical Response Laws of Axle Load to Large-Thickness Flexible Pavement Structure in Guangxi

Enlian Xie^{1*}, Yihua Nie², Bo Tan³, Xinyao Huang², Guoqing Yu¹, Yutao Li¹

¹Guangxi Tianxin Expressway Co., Ltd., Chongzuo Guangxi

²School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

*第一作者。

文章引用: 谢恩连, 聂忆华, 谭波, 黄新摇, 于国庆, 李钰涛. 轴载对广西大厚度柔性路面结构的力学响应规律分析[J]. 土木工程, 2023, 12(11): 1397-1407. DOI: 10.12677/hjce.2023.1211159

Abstract

In order to study the durability structure of Guangxi's large-thickness flexible pavement, a Guangxi large-thickness flexible pavement test section structure was proposed based on the design parameters and traffic conditions of the Tianxin Expressway project in this paper. The mechanical response law and design parameter change law under 5 different axle loads were studied using discrete element software, providing an important reference for the application and promotion of large-thickness flexible asphalt pavement structures in Guangxi. The research results found that at the center point of the double circular load of the selected large-thickness flexible asphalt pavement structure: as the depth increases, the vertical displacement at the top of each layer gradually decreases, but the vertical displacement at the top of each layer, horizontal tensile stress and compressive strain along the running direction all increase linearly with the increase of axle load; tensile stress growth rate of road surface > roadbed top, compressive stress growth rate of road surface > middle surface layer top > lower layer top > base layer top > roadbed top; tensile strain growth rate of subbase top > base top > lower layer top, and compressive stress growth rate from the highest to the lowest is road surface > middle layer top; during the design period, the cumulative depth of ruts increases linearly with the increase of axle load, with a growth rate of 8.585. Overloading can easily exceed the existing design specifications' rut limits; the cumulative equivalent axle load number corresponding to fatigue cracking of asphalt layer decreases exponentially with the increase of axle load. The fatigue life of asphalt layer in large-thickness flexible pavement structure is long, and it is also much higher than that of conventional asphalt pavement structure under overload.

Keywords

Large-Thickness Flexible Pavement Structure, Axle Load, Mechanical Response, Mpave Software

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 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，随着我国经济的发展，提高沥青路面耐久性和使用寿命已成为中国道路领域的重要任务[1]。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[2]，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的研究[3] [4] [5] [6]，交通运输部公路科学研究所的足尺试验环道与同济大学刘力源等人对大厚度、长寿命沥青路面结构进行了研究，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。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[7]。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，开展了大厚度柔性基层沥青路面结构的力学行为随轴载变化的规律研究，研究成果可为大厚度柔性基层沥青路面结构的应用推广提供重要参考。

2. 大厚度柔性路面结构

结合田新高速项目路面结构[8]和广西大厚度柔性路面结构的特点，确定的广西大厚度柔性路面结构的试验路段结构如表 1 所示。

Table 1. Structure and parameters of large-thickness flexible pavement test section
表 1. 大厚度柔性路面试验段结构及参数

结构层位	结构层材料	结构层厚度	结构层泊松比	结构层模量
上面层	AC-13C SBS	4 cm	0.25	11,000 Mpa
中面层	AC-20C SBS	6 cm	0.25	10,000 Mpa
下面层	AC-25C	8 cm	0.25	10,000 Mpa
上基层	ATB-25	20 cm	0.25	10,000 Mpa
下基层	4%水泥稳定碎石	18 cm	0.25	10,000 Mpa
底基层	4%水泥稳定碎石	18 cm	0.25	10,000 Mpa
垫层	级配碎石	16 cm	0.35	200 Mpa
土基			0.4	50 Mpa

3. 路面结构 Mpave 分析模型

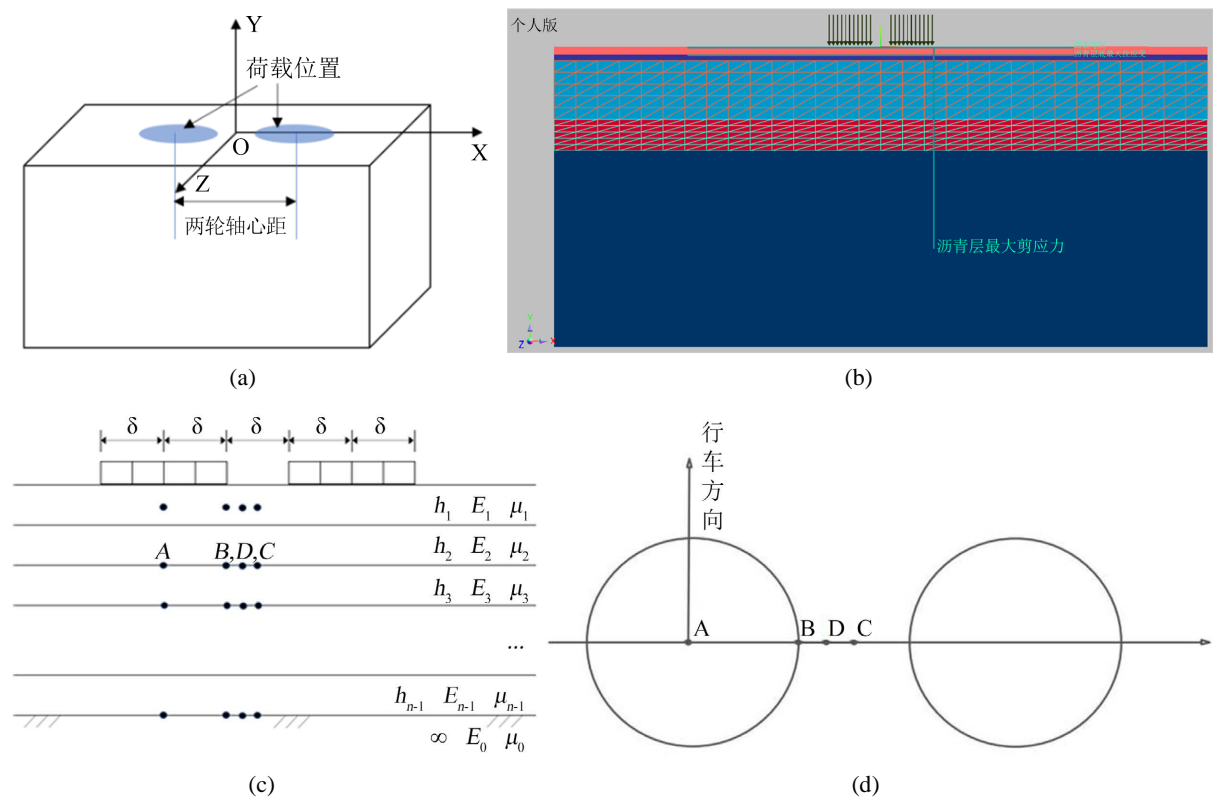


Figure 1. Mechanical calculation model and distribution diagram of load points: (a) Calculation model 3D diagram and coordinate axis; (b) Calculation model discrete grid diagram; (c) Mechanical response calculation point position diagram; (d) Mechanical response calculation load and direction diagram

图 1. 力学计算模型及荷载点位分布图：(a) 计算模型三维示意图以及坐标轴；(b) 计算模型离散网格图；(c) 力学响应计算点位置图示；(d) 力学响应计算荷载及方向图示

本研究采用麦路(Mpave)进行力学分析与模拟计算,图 1 给出了 Mpave 软件设计与计算用的模型。计算用的标准轴载为 0.7 MPa,双圆荷载半径为 0.1065 m,两轮中心距为 0.3195 m,层间完全连续。坐标原点在双圆荷载的中心点,坐标轴 X 轴、Y 轴与 Z 轴分别对应着路面模型的垂直行车方向、竖直方向、沿行车方向。其中, A/B/C/D 四点分为对应单圆荷载圆心点、单圆圆周点、双圆中心点、单圆圆周点与双圆中心点的中分点[9]。

4. 计算分析条件

4.1. 气候、气象条件

广西田新高速项目区 1 月平均气温为 13.8℃,7 月平均气温为 28.1℃,年平均气温为 20.8℃~22.4℃,年无霜期长达 340 多天,年降雨量 1200 毫米以上。

4.2. 交通参数

根据广西田新高速项目工可报告资料,本项目车型比例值及交通量预测结果分别见表 2。路面设计所采用的交通量数据是根据工程可行性研究报告中“交通量分析与预测”作为设计计算依据。

Table 2. Table of traffic parameters

表 2. 交通参数表

设计参数	设计标准
公路等级	高速公路
设计年限	15 年
大型客车和货车交通量	4300 辆/日
年平均增长率	7.48%
车道特征	单项二车道
方向系数	0.55
车道系数	0.8

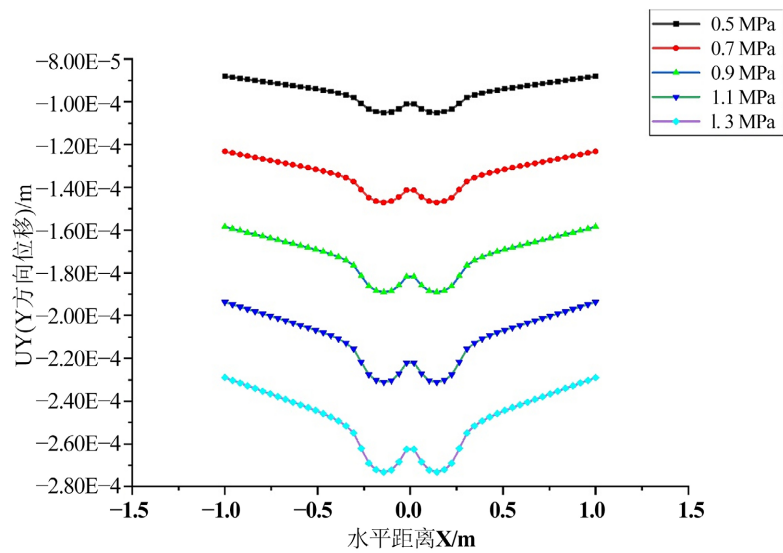
4.3. 荷载参数

分别施加 0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa、1.1 MPa、1.3 MPa 等五个双圆均布荷载进行建模,分析力学参数随轴载的变化规律。

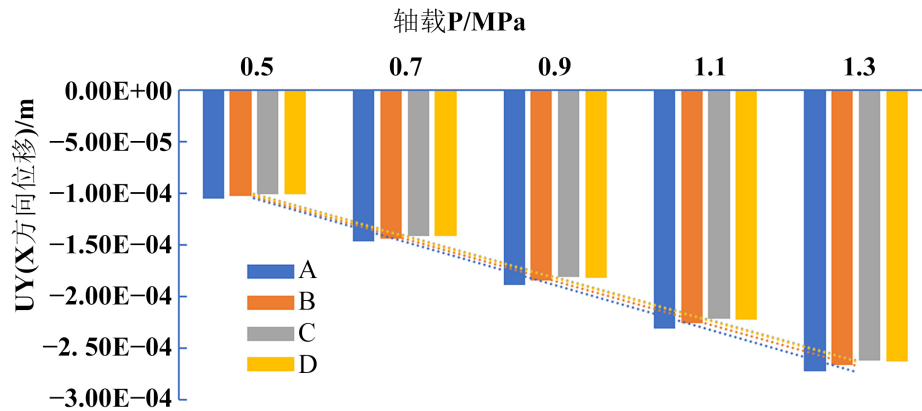
5. 力学响应计算结果与分析

5.1. 竖向位移响应规律

图 2 给出了大厚度柔性路面结构路表竖向位移 UY (沿 X 轴)随轴载变化的分布图及规律图。图上负值表示为反向位移,正值表示为正向位移,并拟合出了轴载与各计算点位路表竖向位移 UY 关系式,见表 3。可见,随轴载的增加,路表处四个关键计算点位的路表竖向位移 UY 呈线性增加,增速由大到小为 A > B > D > C。



(a)



(b)

Figure 2. Change law diagram of vertical displacement of the road surface (along the X-axis): (a) UY distribution diagram (along the X-axis); (b) UY law diagram of key points

图 2. 路表竖向位移变化规律图(沿 X 轴): (a) UY 分布图(沿 X 轴); (b) 关键点位 UY 规律图

Table 3. UY relation between axle load and vertical displacement of road surface (along the X-axis)

表 3. 轴载与路表竖向位移 UY 关系式(沿 X 轴)

计算点位	拟合关系式	相关系数 R^2
A	$y = -4.20E-5x - 6.30E-5$	1.00
B	$y = -4.11E-5x - 6.16E-5$	1.00
C	$y = -4.03E-5x - 6.05E-5$	1.00
D	$y = -4.04E-5x - 6.07E-5$	1.00

图 3 给出了不同轴载下大厚度柔性路面结构沿双圆中心点深度路径的竖向位移 UY (沿 Y 轴)分布图及各层顶的竖向位移变化规律图。图上负值表示为反向位移, 正值表示为正向位移, 并拟合出了轴载与各层顶竖向位移 UY 关系式, 见表 4。可见, 随深度的增加, 各层顶竖向位移 UY 均呈减小趋势; 随轴载

的增加，各层顶竖向位移 UY 均呈线性关系增加，整体上增速差异不大。

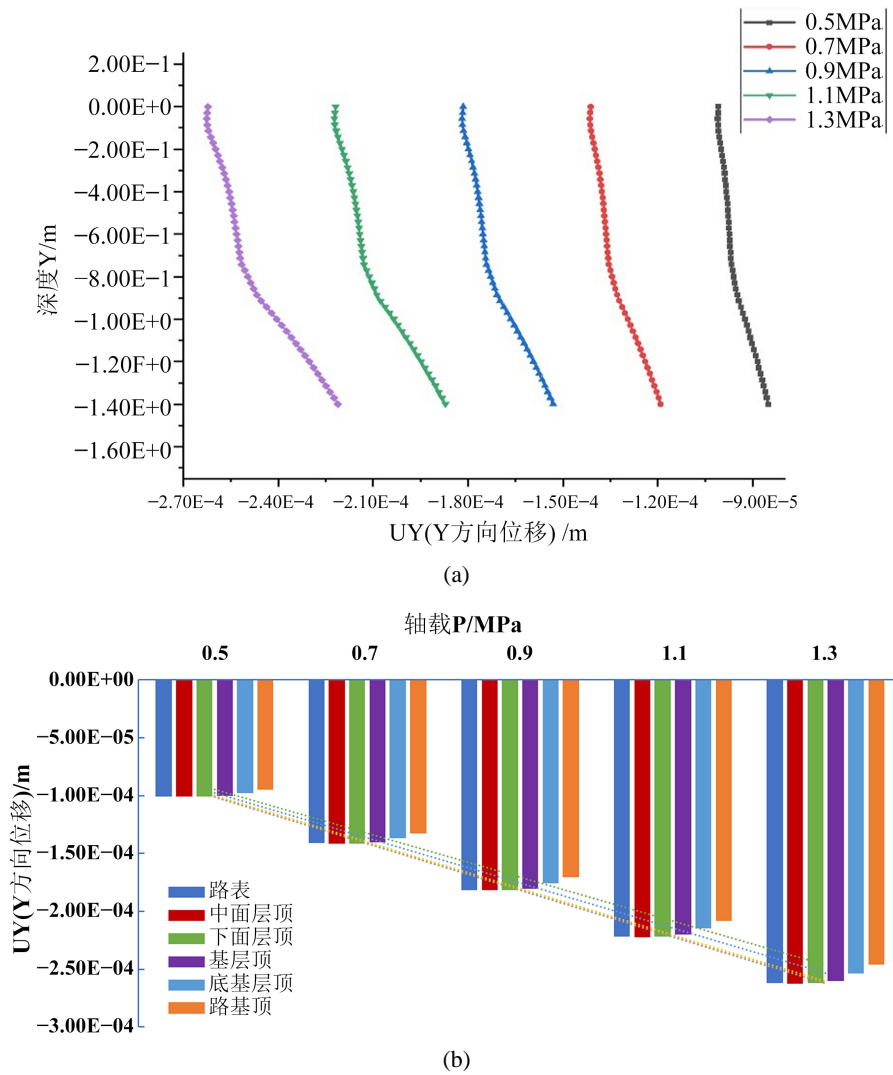


Figure 3. UY law diagram of vertical displacement under different axle load (along the Y-axis): (a) UY distribution diagram (along the Y-axis); (b) UY law diagram of each layer top
图 3. 不同轴载下深度竖向位移 UY 规律图(沿 Y 轴): (a) UY 分布图(沿 Y 轴); (b) 各层顶 UY 规律图

Table 4. UY relation between axle load and vertical displacement of each layer top (along the Y-axis)

表 4. 轴载与各层顶竖向位移 UY 关系式(沿 Y 轴)

计算点位	拟合关系式	相关系数 R^2
路表	$y = -4.04E - 5x - 6.06E - 5$	1.00
中面层顶	$y = -4.03E - 5x - 6.05E - 5$	1.00
下面层顶	$y = -4.04E - 5x - 6.05E - 5$	1.00
基层顶	$y = -4.01E - 5x - 6.01E - 5$	1.00
底基层顶	$y = -3.90E - 5x - 5.85E - 5$	1.00
路基顶	$y = -3.79E - 5x - 5.08E - 5$	1.00

5.2. 水平拉应力响应规律

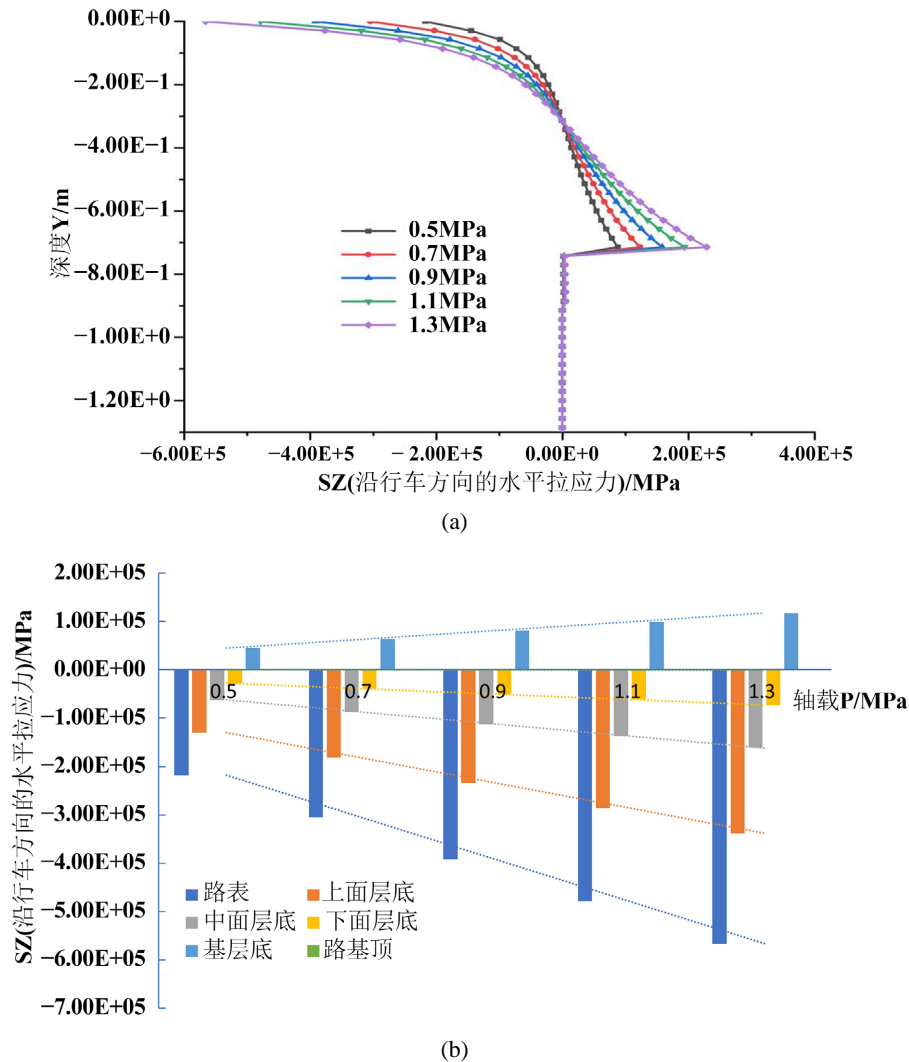


Figure 4. SZ law diagram of horizontal tensile stress in running direction under different axle loads (along the Y-axis): (a) SZ distribution diagram (along the Y axis); (b) SZ law diagram of each layer

图 4. 不同轴载下行车方向水平拉应力 SZ 规律图(沿 Y 轴): (a) SZ 分布图(沿 Y 轴); (b) 各层 SZ 规律图

图 4 给出了大厚度结构路面结构不同轴载下沿深度 X 向水平拉应力(沿 Y 轴)的分布图及规律图。图上负值为压应力，正值为拉应力。具体分析如下：

由分布图可知，路表处行车方向压应力最大，随深度的增加压应力减小，约在下面层附近变为拉应力，至基层底得到一个较大的拉应力；在基层范围内，沿行车方向拉应力随着深度的增加逐渐增大。在底基层内的拉应力随深度的增加变化不大，且拉应力值较小；地基内沿行车方向压应力基本为 0。随着轴载的增加，深度沿行车方向水平拉应力的整体变化规律一致。

轴载与各层顶行车方向拉应力 SZ (沿 Y 轴)关系式(沿 Y 轴)见表 5,可见各层顶行车方向拉应力 SZ (沿 Y 轴)均随轴载的增加呈线性关系增加，其中路表增速最大，路基层顶基本为 0；底基层顶为正增加，其它层顶为负增加；压应力增速由大到小顺序为：路表 > 中面层顶 > 下面层顶 > 基层顶 > 路基层顶。

Table 5. SZ relation between axle load and horizontal tensile stress in running direction of each layer top (along the Y axis)
表 5. 轴载与各层顶行车方向水平拉应力 SZ 关系式(沿 Y 轴)

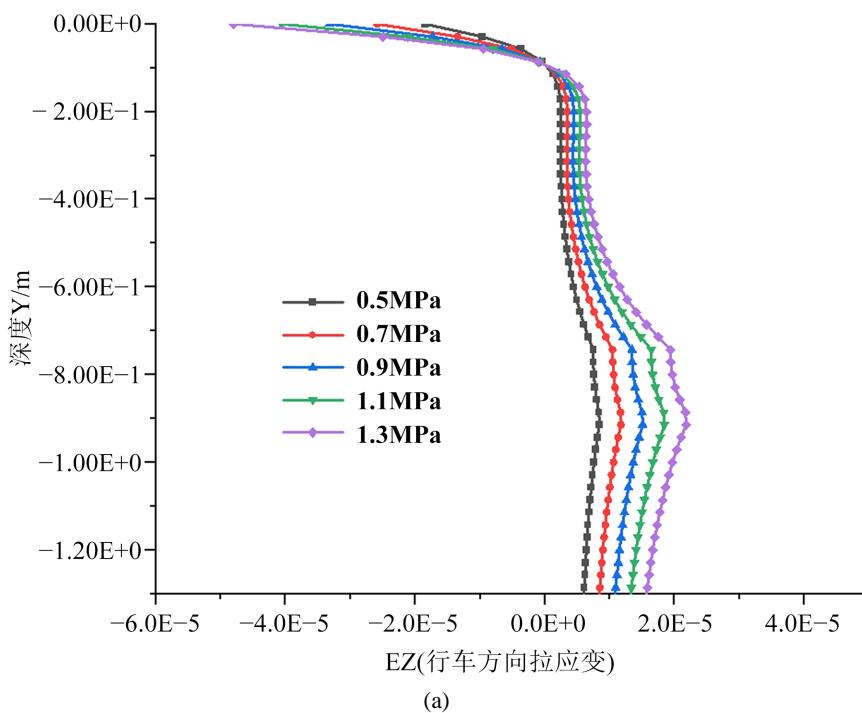
计算点位	拟合关系式	相关系数 R^2
路表	$y = -8.71E + 04x - 1.31E + 05$	1.00
中面层顶	$y = -5.20E + 04x - 7.8E + 04$	1.00
下面层顶	$y = -2.49E + 04x - 3.73E + 04$	1.00
基层顶	$y = -1.12E + 04x - 1.69E + 04$	1.00
底基层顶	$y = -1.80E + 04x + 2.71E + 04$	1.00
路基顶	$y = -7.26E + 01x - 1.09E + 02$	1.00

5.3. 竖向压应变响应规律

图 5 给出了不同轴载下大厚度柔性路面结构沿深度方向,沿行车方向的水平拉应变 EZ (沿 Y 轴)的分布图及规律图。图上负值为压应变, 正值为拉应变。具体分析如下:

由分布图可知, 路表处行车方向压应变最大, 随深度的增加压应变减小, 应变由压变拉; 基层、底基层、路基结构层内拉应变随深度的增加分三段变化: 由于双轮荷载的相互作用影响, 行车方向拉应变在基层至底基层内随着深度的增加而逐渐增大; 在路基中双轮荷载相互作用减弱, 行车方向拉应变随路基深度的增加而逐渐减小。随着轴载的增加, 沿深度、沿行车方向水平拉应变的整体变化规律一致。

轴载与各层顶行车方向拉应变 EZ (沿 Y 轴)关系式(沿 Y 轴)见表 6, 可见各层顶行车方向拉应变 EZ (沿 Y 轴)均随轴载的增加呈线性关系增加, 其中路表增速最大, 下面层顶增速最小; 路表、中面层顶为压应变、负增加, 其它层顶为拉应变、正增加; 拉应变增速由大到小顺序为: 路基顶 > 底基层顶 > 基层顶 > 下面层顶; 压应变增速由大到小顺序为: 路表 > 中面层顶。



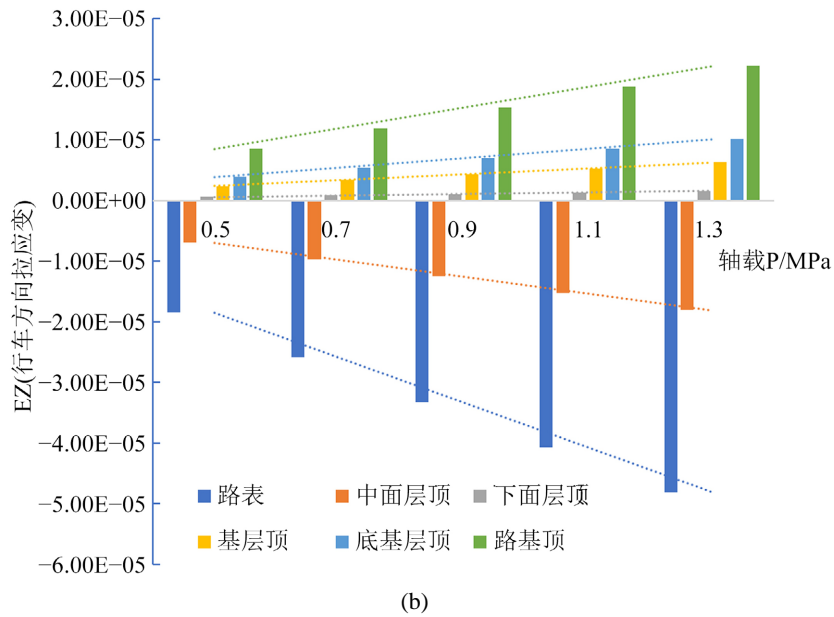


Figure 5. Tensile strain law diagram of running direction under different axle loads (along the Y-axis): (a) EZ distribution diagram (along the Y axis); (b) EZ law diagram of each layer
图 5. 不同轴载下行车方向拉应变规律图(沿 Y 轴): (a) EZ 分布图(沿 Y 轴); (b) 各层 EZ 规律图

Table 6. EZ relation between axle load and tensile strain in running direction of each layer top (along the Y-axis)
表 6. 轴载与各层顶行车方向拉应变 EZ 关系式(沿 Y 轴)

计算点位	拟合关系式	相关系数 R^2
路表	$y = -7E - 06x - 1E - 05$	1.00
中面层顶	$y = -3E - 06x - 4E - 06$	1.00
下面层顶	$y = 2E - 07x + 4E - 07$	1.00
基层顶	$y = 1E - 06x + 1E - 06$	1.00
底基层顶	$y = 2E - 06x + 2E - 06$	1.00
路基顶	$y = 3E - 06x + 5E - 06$	1.00

5.4. 车辙变化规律

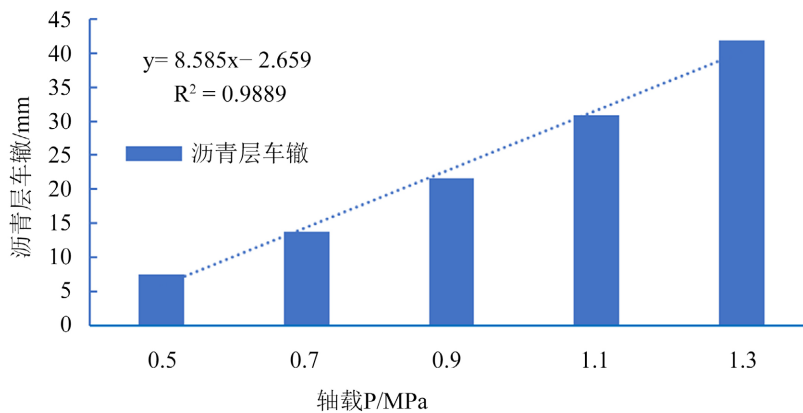


Figure 6. Change law of ruts of asphalt layer with axle load
图 6. 沥青层车辙随轴载变化规律

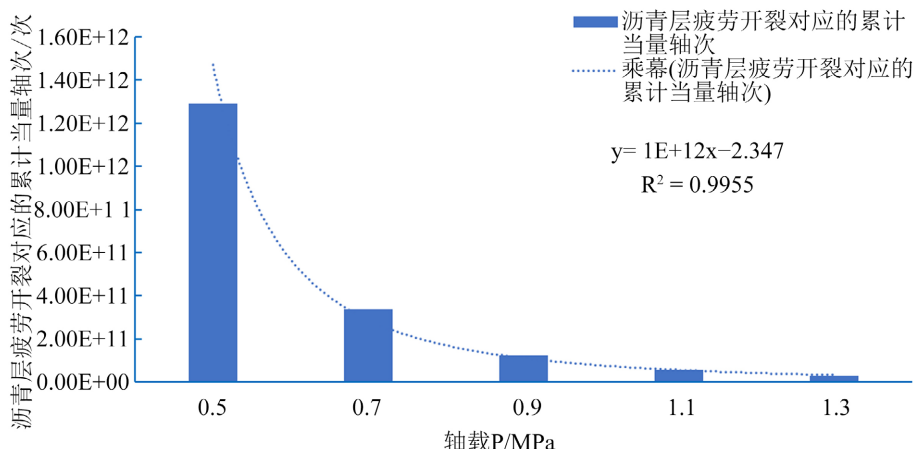


Figure 7. Change law of fatigue life of asphalt layer with axle load
图 7. 沥青层疲劳寿命随轴载变化规律

由图 6 可知, 大厚度柔性路面结构的路面车辙深度随轴载的增加呈线性增加, 其增长率为 8.585。我国现行规范中容许车辙深度设计值为小于 15 mm, 可见所选的大厚度柔性路面结构的车辙深度在标准轴载 0.7 MPa 时为 13.7 mm, 满足设计要求, 当轴载超过 0.9 MPa 后, 车辙深度不再满足设计要求。

5.5. 疲劳寿命变化规律

由图 7 可知, 大厚度柔性路面结构的沥青层疲劳寿命随轴载的增加呈指数减少, 随轴载增加的降幅非常大。当验算沥青混合料层疲劳开裂时, 田新高速公路主线半刚性基层沥青路面设计使用年限内设计车道上的当量设计轴载累计作用次数为 $4.80E+07$, 所选大厚度柔性路面结构在 1.3 MPa、0.7 MPa、0.5 MPa 时的沥青层疲劳开裂对应的累计当量轴载次数分别为 $2.91E+10$, $3.40E+11$, $1.29E+12$, 可见远远高于常规沥青路面结构的沥青层疲劳寿命。

6. 结论

本文以广西田新高速项目的设计参数和交通条件为基础, 提出广西大厚度柔性路面试验段结构, 利用离散元软件分析了试验段结构的力学响应随 5 种不同双圆均布荷载的变化规律, 获得如下结论:

- 1) 随着深度的增加, 各层顶竖向位移值慢慢减小; 随轴载的增加, 不同深度处各层顶竖向位移均呈线性增加, 整体上增速差异不大。
- 2) 路表处行车方向压应力最大, 随深度的增加而减小; 在下面层附近变为拉应力, 至基层底拉应力增加较大; 底基层内拉应力随深度的增加变化不大且值较小。各层顶沿行车方向水平拉应力均随轴载的增加呈线性关系增加。
- 3) 路表处行车方向压应变最大, 随深度的增加压应变减小, 应变由压变拉; 拉应变随基层、底基层深度的增加而增大, 随路基深度的增加而减小。
- 4) 大厚度柔性路面结构的沥青层疲劳寿命随轴载的增加呈指数减少, 降幅非常大。对于大厚度柔性路面结构, 沥青层疲劳开裂对应的累计当量轴载次数即使在超载下也远高于常规沥青路面结构的沥青层疲劳寿命, 寿命长。

基金项目

广西交通运输行业重点科技创新研发项目(桂交便函(2022) 174 号 No. 8); 广西交通投资集团科研项

目(田新合工 2021-003 号); 湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ30259)。

参考文献

- [1] 郑健龙. 基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 1-7.
- [2] 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.
- [3] 沙庆林. 重载交通长寿命半刚性路面设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [4] 彭红卫, 吕绍文, 孙剑峰. 全柔性长寿命沥青路面轴载影响规律研究[J]. 湖南交通科技, 2023, 49(1): 48-51.
- [5] 唐艳华, 聂忆华, 毛愷, 刘福财. 基于 Mpave 的高性能混凝土沥青路面沥青层剪应力分析[J]. 广东建材, 2022, 38(1): 55-59.
- [6] 彭红卫, 孙剑峰, 吕绍文. 基于麦路软件的高性能沥青路面力学性能分析[J]. 广东建材, 2022, 38(8): 60-64+30.
- [7] 聂忆华. 全柔式长寿命沥青路面结构(FF-LLAP)及其设计方法研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [8] 巴马-凭祥高速公路田东经天等至大新段两阶段施工图设计[R]. 北京: 北京交科勘察设计研究院有限公司, 2021.
- [9] 刘伯莹, 孟书涛, 牛开民, 等. JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.