

车轮动载作用下RUHPC + AC复合试件的力学响应分析

陈海冰¹, 聂忆华^{1*}, 钟世雄¹, 毛 惺²

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²广东盖特奇新材料科技有限公司, 广东 清远

收稿日期: 2024年11月4日; 录用日期: 2024年11月30日; 发布日期: 2024年12月5日

摘 要

为了探究RUHPC + AC复合式路面在车轮动载下的力学响应规律, 制作了RUHPC + AC复合试件, 进行车轮动态载荷力学响应试验, 从应变特性和应变变化幅度两方面重点对AC层应变进行了深入分析。结果表明: AC层顶和层底纵向在加载初期处于拉压复合应变状态, 前者主要受压, 后者主要受拉, 达到一定加载时间后呈现为全部受压。此外, AC层纵向、竖向应变随加载时间呈现对数关系增大趋势, 而AC层应变变化幅度随加载时间呈线性关系减小。研究结论为RUHPC + AC复合式路面的设计和维护提供了参考依据, 有助于该复合式路面在未来道路工程领域的推广。

关键词

RUHPC + AC, 车轮动载, 力学响应, 复合试件, AC层应变

Mechanical Response Analysis of RUHPC + AC Composite Specimens under Dynamic Wheel Loading

Haibing Chen¹, Yihua Nie^{1*}, Shixiong Zhong¹, Xing Mao²

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Guangdong Gaiteqi New Materials Technology Co., Ltd., Qingyuan Guangdong

Received: Nov. 4th, 2024; accepted: Nov. 30th, 2024; published: Dec. 5th, 2024

Abstract

In order to investigate the mechanical response law of RUHPC + AC composite pavement under wheel

*通讯作者。

文章引用: 陈海冰, 聂忆华, 钟世雄, 毛惺. 车轮动载作用下 RUHPC + AC 复合试件的力学响应分析[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2182-2189. DOI: 10.12677/hjce.2024.1312240

dynamic loading, RUHPC + AC composite specimens were fabricated, the mechanical response test of wheel dynamic loading was carried out, and the AC layer strain was analyzed in-depth from the aspects of strain characteristics and strain change amplitude focusing on the AC layer strain. The results show that the longitudinal direction of the top and bottom of the AC layer is in the state of tension-pressure composite strain at the beginning of loading; the former is mainly subjected to compression, and the latter is mainly subjected to tension, and all of them are subjected to compression after reaching a certain loading time. In addition, the longitudinal and vertical strains of the AC layer showed a trend of increasing logarithmically with loading time, while the magnitude of strain change of the AC layer decreased linearly with loading time. The conclusions of the study provide a reference basis for the design and maintenance of RUHPC + AC composite pavements, which will help the composite pavements become popular in the field of road engineering in the future.

Keywords

RUHPC + AC, Wheel Dynamic Loading, Mechanical Response, Composite Specimen, AC Layer Strain

Copyright © 2024 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

道路工程用的超高性能混凝土(Road Ultra-High Performance Concrete, RUHPC), 其各项性能几乎全面超越普通水泥混凝土, 综合性能非常全面[1] [2], 最重要的是满足道路层位高模量、抗疲劳、封水的要求。RUHPC层具有完全连续、密实、超高韧性、超高强度和经济等特点, 上面加铺薄层沥青 AC 面层, 不仅具备已有刚柔复合式路面的优点, 而且施工方便、易于实现, 因此提出 RUHPC + AC 复合式沥青路面结构。该设计方案不仅在技术上具有创新性, 而且在道路材料工程中具有潜在的广泛应用前景。该复合式路面作为一种新的路面结构形式, 相关研究目前少见, 如唐艳华等[3] [4]用 Mpave 对 RUHPC + AC 复合路面进行结构力学分析, 并对其界面结合进行深入研究; 毛惶等[5]探究了在温度作用下 UHPC + AC 试件的变形规律。

道路工程设计中现行的主流方法是将车辆荷载视为静荷载, 路面结构视为弹性体系结构。但随着高速公路运输高速重载化趋势的不断发展, 动态荷载作用下路面结构产生的各种病害已经无法用静载模式下的力学响应规律来解释。因此, 研究动态荷载作用下沥青路面的力学响应规律具有十分重要的意义。如邢丹等[6]对复合式基层和半刚性基层两种沥青路面结构进行力学响应分析, 研究不同厚度或模量下两种路面的瞬态特征; 刘凯等[7]利用 ABAQUS 软件建立半刚性沥青路面的三维有限元模型, 研究在半波正弦动态荷载和移动恒定荷载两种动态荷载作用下的路面动态响应; 张宜洛等[8]借助 ABAQUS 有限元计算平台建立路面三维模型, 施加动态荷载实现路面的动力响应, 研究了应对组合式基层路面高、低温与动态荷载作用下的路面力学响应; 张敏江等[9]研究了动态荷载作用下不同封层沥青路面的力学响应; 赵博文[10]基于弹性层状体系理论, 应用 BISAR 软件对标准轴载和不同超载状态下半刚性基层沥青路面的力学响应进行分析; 何基雷等[11]利用 ABAQUS 软件构建了不同沥青路面结构应力响应模型, 分析荷载形式、车辆轴载、行驶速度等因素对力学响应的影响; Liu [12]基于瞬态动力学理论, 利用 ANSYS 软件建立了重载下半刚性基层上的沥青路面模型, 总结路面各层挠度、横向和纵向应力、剪应力和应变规律; Chen 等[13]利用足尺试验, 对重载作用下复合式路面动力响应进行研究, 分析轮胎胎压和行车速度对复合式路面动态响应的影响, 提出了应力沿路基深度的非线性模型。

目前, 对动态荷载研究还主要集中在传统半刚性基层路面结构。然而这些研究为指导 RUHPC + AC

复合式路面的力学响应分析提供了一些相关思路和方法。通过制作 RUHPC + AC 复合试件, 结合恒温式沥青混合料车辙试验仪和动态信号测试系统进行车轮动载试验研究, 重点分析 AC 层的力学响应规律。从中得出了 RUHPC + AC 复合试件在车轮动载条件下的力学响应规律, 为 RUHPC + AC 复合路面结构设计提供了重要参考, 也有助于进一步探索和验证 RUHPC + AC 复合路面结构的性能和适用性, 为该结构在道路工程领域的广泛应用和推广提供了坚实的基础。

2. 试验描述

RUHPC + AC 复合试件的 AC 层, 参考规范[14]采用 AC-13, 70#道路石油沥青、石灰岩碎石和矿粉, 油石比为 5.04%; RUHPC 材料主要成分为水泥、复合掺合料、石英砂、高效减水剂、碎石、钢纤维等; 界面处理方式为粘结层(改性乳化沥青 1 kg/m^2) + 嵌石(9.5~13.2 mm 嵌石粒径、50%撒布面积), 采用车辙仪轮碾成型的方式制作 RUHPC + AC 复合试件。采用车辙仪轮碾成型的方式制作 RUHPC + AC 复合试件。试件成型方法, 先浇筑成型 RUHPC 层, 然后在 RUHPC 硬化前嵌石, 然后撒粘结层, 最后在轮碾成型机中碾压成型热拌 AC 层, 养生后切割成型。

本次试验制作 RUHPC + AC 小型复合试件配合沥青混合料车辙试验仪以及东华 DH3822 便携式动态信号测试系统进行研究, 流程图如图 1 所示。

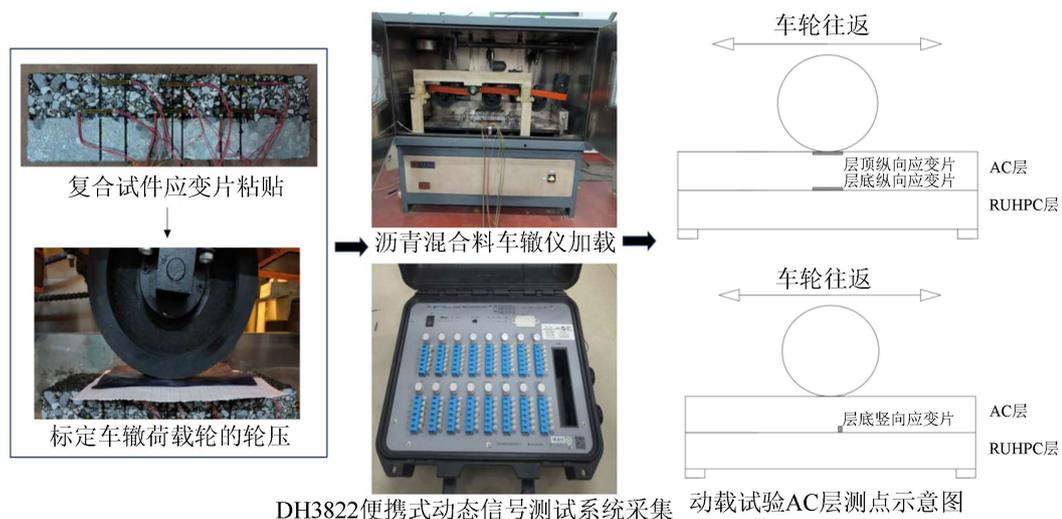


Figure 1. Wheel dynamic load test and data acquisition flowchart

图 1. 车轮动载试验及数据采集流程图

试验具体步骤如下:

1) 制作尺寸为 $300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 、RUHPC 层和 AC 层厚为 4cm 的复合试件共 10 组, 并粘贴应变片。要求在 AC 层 1/4 点跨中的层底及层顶处横向粘贴应变片测量纵向拉应变, 在 AC 层底处竖向粘贴应变片测量竖向压应变, 各应变片粘贴示意图如图 1 所示。

2) 标定试验轮的荷载压强为 $0.7 \pm 0.05 \text{ MPa}$, 在车轮下放置复写纸与方格纸用于测试接地面积, 如图 1 所示。

3) 在对复合试件进行预处理后, 将其放置于车辙仪的试验台上并进行固定。接着, 设定控温系统的温度为 20°C 。连接应变片与控制箱, 并在试验前进行应变片的检验, 确认无误后即可开始加载试验。相关仪器设备的示意图如图 1 所示。

4) 动载测试: 试验起始位置固定为试件跨中, 通过监测和记录 AC 层的应变响应情况来总结分析试

件的动态规律,如图1所示。单个试件试验过程中,总共进行了5轮加载,每轮加载持续1小时,轮载速度为42次/min。在每轮加载后,需要等待1小时的间隔时间,才能进行下一轮加载,以确保试件的稳定性和试验准确性。

5) 重复以上试验步骤加载完成剩余9组重复试验,以确保试验数据的科学性和准确性。

3. 动载作用下的力学响应

3.1. AC层顶、层底纵向应变

通过动态信号测试系统采集的数据绘制RUHPC+AC复合试件AC层测点的纵向应变图,如图2,图3所示。

1) 根据图2和图3可知,在动载加载初期阶段,AC层顶部沿车轮方向呈现出拉压复合的应变状态,但主要为受压状态,即压应变 > 拉应变;而AC层底部沿车轮方向则短暂地受到拉伸,随后呈现拉压复

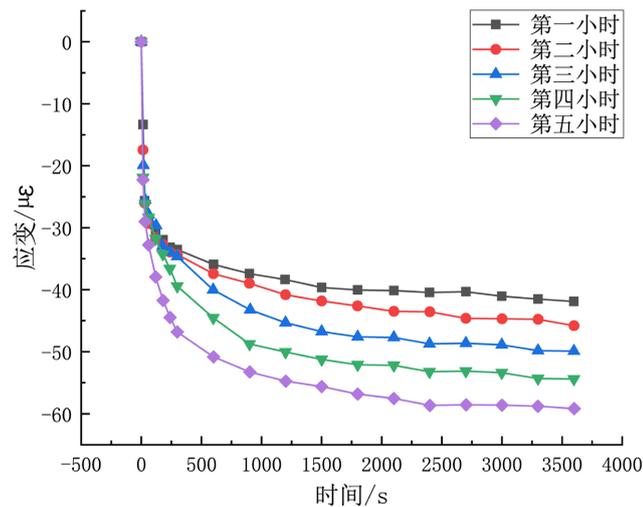


Figure 2. Longitudinal strain at the top of AC layer
图2. AC层顶纵向应变

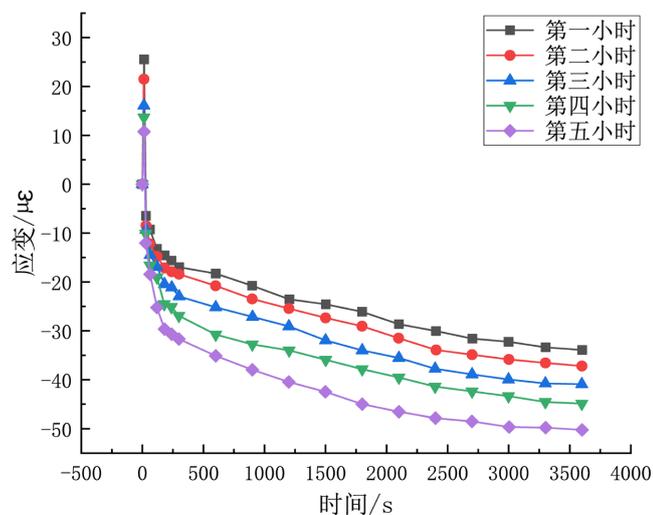


Figure 3. Longitudinal strain at the bottom of AC layer
图3. AC层底纵向应变

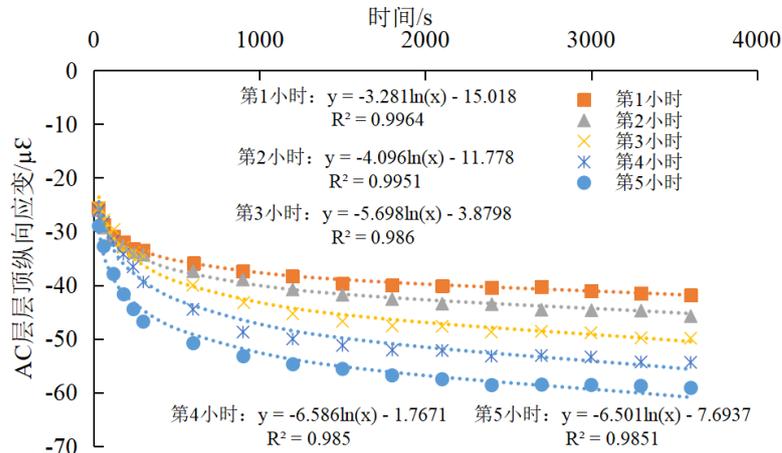


Figure 4. Fitted longitudinal strain curve at the top of the AC layer

图 4. AC 层层顶纵向应变拟合曲线

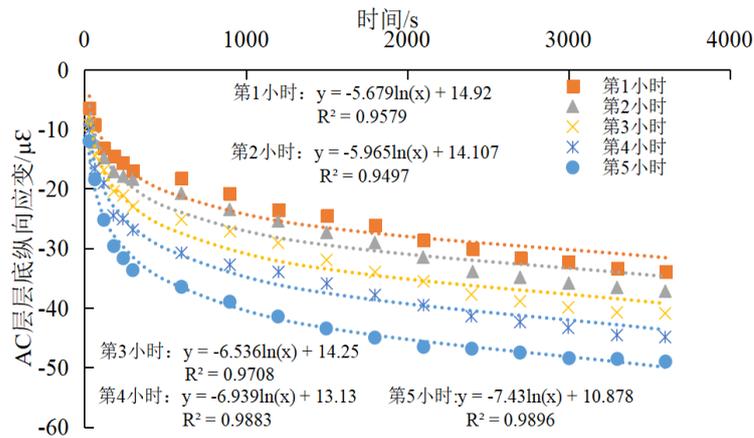


Figure 5. Fitted longitudinal strain curve at the bottom of the AC layer

图 5. AC 层层底纵向应变拟合曲线

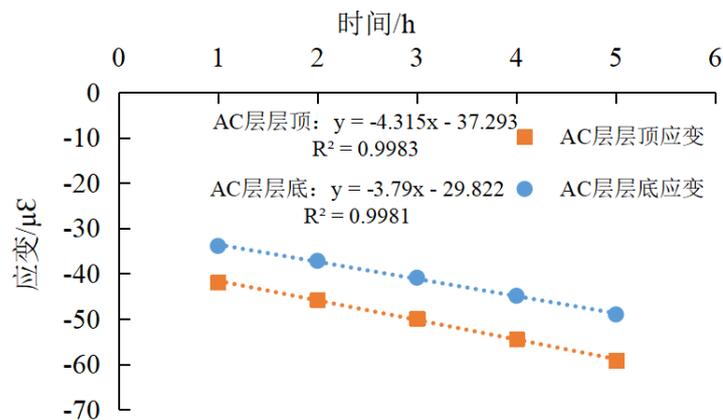


Figure 6. AC layer longitudinal strain fitting results

图 6. AC 层纵向应变拟合结果

合应变状态，但主要为受拉状态，即拉应变 > 压应变。随着加载时间的增加，后期均表现为全部受压的状态。这是因为随着加载时间的增加，路面结构逐渐适应了动态荷载的作用，其变形逐渐趋向稳定状态，

使得 AC 层顶部和底部最终都受到了较为均匀的压缩应力。

2) 根据图 2 和图 3 可知, 在单次车轮加载试验中, 在动态加载的前 600 秒内应变迅速发展, 占总应变的 50% 以上, 随后应变变化逐渐缓慢。600 秒后的 AC 层底部的应变变化幅度 > AC 层顶部的应变变化幅度。下一轮试验加载的应变值均大于上一轮试验加载的应变值。这是由于路面结构在第一次加载后已经发生了一定程度的变形, 使得下一次加载时路面结构的初始状态不同, 因此会导致下一轮试验加载的应变值大于上一轮试验加载的应变值。这种现象可能与路面结构的弹性回复、材料损伤累积等因素有关。

3) 根据图 4 和图 5 可知, 在每一轮试验中, AC 层顶部和底部的纵向应变都随加载时间增加呈现对数关系增加趋势。

4) 根据图 6 可知, 在每轮试验结束后, AC 层层顶和层底纵向应变最大值均随加载时间增加呈线性增加趋势, 且层顶纵向应变 > 层底纵向应变。

3.2. AC 层底竖向应变

通过动态信号测试系统采集的数据绘制 RUHPC+AC 复合试件 AC 层测点的竖向应变图, 如图 7 所示。

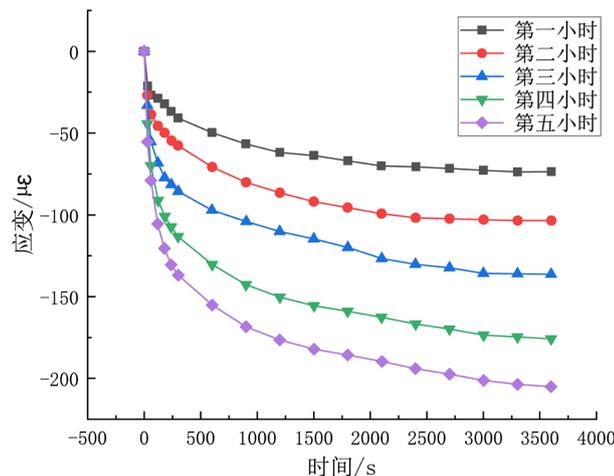


Figure 7. AC bottom vertical strain
图 7. AC 层底竖向应变

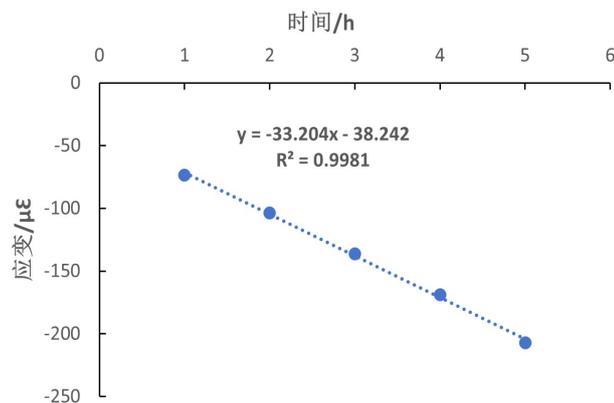


Figure 8. Results of vertical strain fitting at the bottom of the AC layer
图 8. AC 层底竖向应变拟合结果

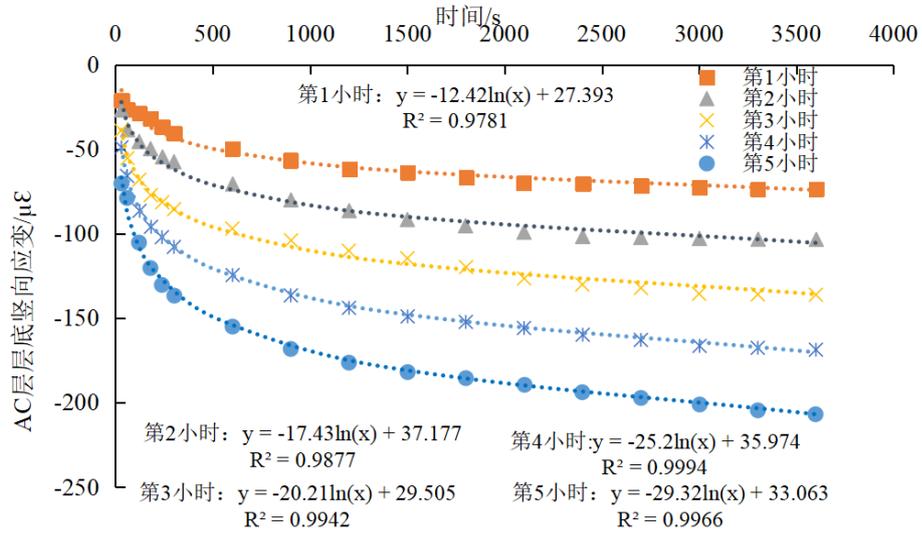


Figure 9. Fitted vertical strain curves at the base of the AC layer

图 9. AC 层层底竖向应变拟合曲线

1) 根据图 7 可知, 在每一轮试验中, 动载加载的前 600 秒内应变迅速发展, 随后应变变化逐渐减缓。AC 层层底竖向全部表现为受压状态。这是由于在初始加载时, 会出现明显的瞬时变形, 而随着时间推移, 材料内部的能量释放和微观结构逐渐趋于稳定, 应变速率降低, 表现为典型的衰减曲线。此外, AC 层层底部的材料在动载反复作用下可能产生压实和微观结构调整的现象, 也会导致应变发展逐渐减缓。

2) 根据图 8 可知, 在每一轮试验结束后, AC 层层底竖向应变的最大值相较上一轮不断增大, 呈现线性增长趋势。

3) 根据图 9 可知, 在每一轮试验中, AC 层层底竖向应变随加载试验时间呈现对数关系增大趋势。

3.3. AC 层应变变化幅度

对 AC 层应变变化幅度进行线性回归拟合分析, 可知在 AC 层底部, 竖向应变初期变化幅度最大, 但衰减幅度也是最为明显。AC 层底纵向应变变化幅度 > AC 层顶纵向应变变化幅度, AC 的层顶和层底应变变化幅度均随试验时间增加呈现线性减小趋势。这表明随着试验时间的增加, 路面结构逐渐适应了动态荷载的作用, 其变形逐渐减小, 达到了一定的稳定状态。拟合结果如图 10 所示。

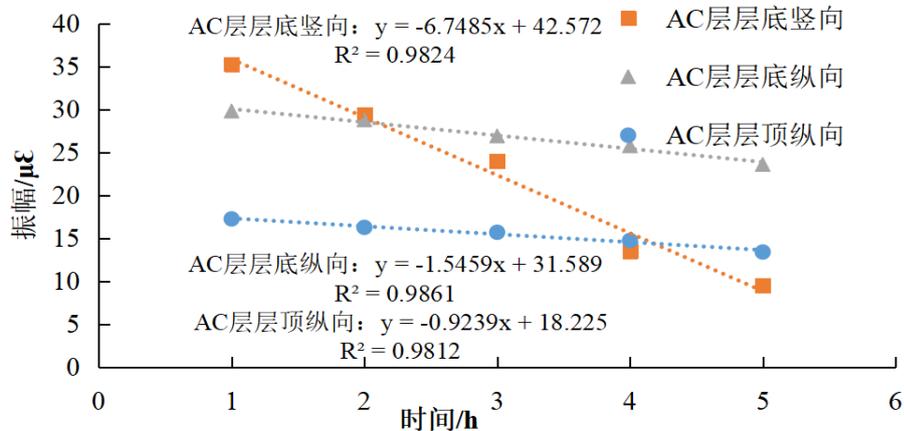


Figure 10. Results of fitting the magnitude of strain changes in the AC layer

图 10. AC 层应变变化幅度拟合结果

4. 小结

本文以 RUHPC + AC 复合试件为研究对象, 重点探讨了在车轮动载作用下 AC 层的力学响应规律, 通过试验数据分析得出以下结论:

1) 在车轮动载作用下, AC 层纵向和竖向应变在加载前期迅速发展, 占到总应变的 50% 以上, 随即变化逐渐减缓。

2) AC 层顶和层底纵向在加载初期呈现拉压复合应变状态, 前者主要受压, 后者主要受拉, 随着加载时间增加均呈现全部受压状态。而 AC 层底的竖向应变始终为压应变。

3) 在每一轮加载实验中, AC 层纵向和竖向应变均随加载试验时间增加呈现对数关系增大趋势, 而 AC 层应变变化幅度均随加载试验时间增加呈线性关系减小趋势。

研究结论为 RUHPC + AC 复合式路面的 AC 层结构设计方案和养护提供了参考依据, 也有助于进一步探索和验证 RUHPC + AC 复合路面结构的性能和适用性, 有助于该复合式路面结构在未来道路工程领域的推广。

基金项目

湖南省自然科学基金面上项目(2022JJ30259)。

参考文献

- [1] Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q. and Zhang, Z. (2020) Durability of Ultra-High Performance Concrete—A Review. *Construction and Building Materials*, **255**, Article 119296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- [2] 阎培渝. 超高性能混凝土(UHPC)的发展与现状[J]. 混凝土世界, 2010(9): 36-41.
- [3] 唐艳华. RUHPC + AC 复合路面结构力学分析及界面结合研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
- [4] 唐艳华, 聂忆华, 毛愷, 等. 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.
- [5] 毛愷, 聂忆华, 钟世雄, 刘福财, 肖敏. 温度作用下 UHPC + AC 复合试件的变形规律[J]. 土木工程, 2023, 12(6): 737-745.
- [6] 邢丹, 罗晓岚. 级配碎石复合式基层沥青路面力学响应研究[J]. 公路工程, 2020, 45(3): 240-246.
- [7] 刘凯, 徐晓美, 张磊等. 动态荷载作用下半刚性沥青路面动力响应研究[J]. 森林工程, 2019, 35(2): 82-86, 92.
- [8] 张宜洛, 邓展伟, 郭创. 基于动载作用的组合式柔性基层路面典型结构优化设计研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 16-23.
- [9] 张敏江, 于江, 郭超, 等. 动态荷载作用下不同下封层沥青路面力学响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 100-108.
- [10] 赵博文. 超载状态下半刚性基层沥青路面力学响应分析[J]. 北方交通, 2024(6): 59-61, 65.
- [11] 何基雷, 罗资清, 傅松. 动、静荷载下不同沥青路面结构力学响应分析[J]. 西部交通科技, 2024(3): 68-72.
- [12] Zhang, L.J. (2013) Dynamic Response of Asphalt Pavement on Semi-Rigid Base Due to Heavy Load. *Applied Mechanics and Materials*, **405**, 1745-1752. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.405-408.1745>
- [13] Chen, X., Zhang, J. and Wang, X. (2015) Full-Scale Field Testing on a Highway Composite Pavement Dynamic Responses. *Transportation Geotechnics*, **4**, 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.05.002>
- [14] 交通运输部公路科学研究院. JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.