

基于传感器的组合式柔性基层路面结构动力响应监测分析

吴文鸿¹, 李东钊², 徐惠彬¹, 高超³, 严二虎²

¹泉州达顺高速公路建设有限公司, 福建 泉州

²交通运输部公路科学研究所, 北京

³福建省高速公路科技创新研究院有限公司, 福建 福州

收稿日期: 2025年3月27日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

摘要

为探究组合式柔性基层路面结构的动力响应, 评价路面结构在真实汽车荷载下的受力状态, 本研究针对组合式柔性基层沥青路面开展试验段测试与分析。通过在各结构层底埋设三向应变传感器, 并设定不同车速、车辆载重方案对试验路段进行重复加载, 对各项应变数据进行采集与分析。结果表明: 车速对各结构层动态响应影响显著, 随车速增加, 各层应变减小, 应变响应时间变短; 横向应变和竖向应变的极大值在AC-20C层底, 拉应变极大值在水泥稳定基层底部, 级配碎石层应变响应幅度小, 应力消散作用良好。车辆轴重对结构层响应有明显影响, 轴重增加会导致应变响应极值增大。因此车速、深度、轴重对路面结构力学响应影响显著, 研究成果可为组合式柔性基层结构路面设计及超载控制提供参考, 有利于保障沥青路面安全服役和健康水平。

关键词

道路工程, 组合式柔性基层, 路面结构, 传感器, 动力响应

Monitoring and Analysis of the Dynamic Response of the Combined Flexible Base Pavement Structure Based on Sensors

Wenhong Wu¹, Dongzhao Li², Huibin Xu¹, Chao Gao³, Erhu Yan²

¹Quanzhou Dashun High-Speed Highway Construction Limited Company, Quanzhou Fujian

²Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing

³Fujian Provincial Expressway Science and Technology Innovation Research Institute Limited Company, Fuzhou Fujian

Received: Mar. 27th, 2025; accepted: Apr. 18th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

文章引用: 吴文鸿, 李东钊, 徐惠彬, 高超, 严二虎. 基于传感器的组合式柔性基层路面结构动力响应监测分析[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 880-892. DOI: 10.12677/hjce.2025.144095

Abstract

In order to explore the dynamic response of the combined flexible base pavement structure and evaluate the stress state of the pavement structure under the real vehicle load, this study carried out the test section test and analysis for the combined flexible base asphalt pavement. By embedding three—dimensional strain sensors at the bottom of each structural layer and setting different vehicle speeds and vehicle load schemes to repeatedly load the test section, the strain data were collected and analyzed. The results show that the vehicle speed has a significant impact on the dynamic response of each structural layer. With the increase of the vehicle speed, the strain of each layer decreases and the strain response time becomes shorter; the maximum values of the transverse strain and the vertical strain are at the bottom of the AC-20C layer, the maximum tensile strain is at the bottom of the cement stabilized base, and the strain response amplitude of the graded crushed stone layer is small, with a good stress dissipation effect. The vehicle axle load has an obvious impact on the response of the structural layer, and the increase of the axle load will lead to the increase of the extreme value of the strain response. Therefore, the vehicle speed, depth and axle load have a significant impact on the mechanical response of the pavement structure. The research results can provide a reference for the design of the combined flexible base structure pavement and the overload control, which is conducive to ensuring the safe service and health level of the asphalt pavement.

Keywords

Road Engineering, Combined Flexible Base, Pavement Structure, Sensor, Dynamic Response

Copyright © 2025 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

路面作为交通运输的关键基础设施，其力学性能直接决定了道路的使用寿命和行车安全。随着经济的快速发展，交通流量持续增长，车辆荷载日益加重，对路面结构的力学性能提出了更高的要求。准确把握路面在车辆荷载作用下的力学响应，深入探究路面结构服役性能的变化规律，对于开发耐久长寿的沥青路面结构至关重要。传统的沥青路面力学分析方法，如有限元或离散元技术，虽然在建立路面仿真模型方面有广泛应用，但由于理论假设、计算过程以及模型简化等因素，无法真实还原道路结构的力学响应状态。传感器技术的发展为解决这一问题提供了新的途径，其具有高精度、抗干扰能力强以及可检测内部动力响应等显著优点，在路面力学性能研究中逐渐得到广泛应用[1]-[3]。

国外学者在现场动力响应实测研究方面开展较早。例如，在美国俄亥俄州路面结构中埋设了大量传感器元件，对不同温度状态下的沥青路面在车辆行驶下的动力响应特点进行了测试，并依据路面受力特点提出了耐久性结构和材料的设计方案[4]。Loulizi [5]等在路面内部埋设土压力计、应变传感器等，通过现场实测数据建立了不同车速和轴重下应力及应变响应变化规律，并探究了应变与温度之间的关系。在中国，对路面结构的现场测试起步相对较晚，测试元件主要为电阻式传感器和光纤光栅传感器[6]-[8]。杨永顺[9]在滨州长寿沥青路面内部布设传感器，实测了荷载及环境作用下路面结构响应信息；董泽蛟[10]在基于光纤光栅传感器对车辆荷载作用下沥青路面结构动力响应进行了实测，针对动态加载时沥青面层

层底的应变变化开展分析；陈少幸[11]等利用焊接式传感器和光纤式传感器对长寿命沥青路面动力响应进行了监测分析，验证了光纤光栅传感器对沥青路面动力响应监测的可行性。李科[12]采用轮胎橡胶作为光纤光栅传感器封装材料监测沥青混凝土应变，基于车辙试件的静载及动载试验监测沥青混凝土结构内部应变变化规律。赵延庆[13]针对重载交通路面在超载作用下的动力响应特性展开研究，采用室内足尺试验和数值模拟相结合的方法，分析了路面结构在不同超载工况下的力学响应规律。杨献章[14]研究了路面结构动力响应存在关联，证明在路面结构中不同层次的组合方式及性能影响着整体动力响应。张雨薇[15]聚焦道路结构动力响应和车载动力特性，对道路结构在动态车载作用下的力学响应进行了准确量化。但以往研究多针对半刚性基层，而组合式柔性基层为福建省典型结构，在福建建成里程约 5000 公里，约占福建省公路总里程的 85%，但针对组合式柔性基层结构研究多为模型分析，尚未开展系统的实测荷载测试，缺乏实际路面环境和荷载下的路面真实数据。因此，本文依托福建省高速公路实体工程，分析组合式柔性基层沥青路面结构动力响应规律及影响因素，以期为该路面结构沥青路面结构动态响应研究奠定数据基础。

2. 试验段测试

2.1. 试验段结构方案

依托福建省某高速公路实体工程，选取福建省典型组合式柔性基层沥青路面为研究对象，从上至下为 5 层，结构组合形式为 4.5 cm 中粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-16C) + 5.5 cm 中粒式改性沥青混凝土下面层(AC-20C) + 16 cm 粗粒式密集配沥青碎石上基层(ATB-25) + 18 cm 级配碎石下基层 + 1 cm 下封层 + 32 cm 3%水泥稳定碎石底基层，传感器的埋设位置示意图如图 1 所示，分别在 AC-20C 层底、ATB-25 层底、级配碎石层底、水泥稳定碎石层底埋设应变传感器，以监测各层横向和纵向应变，并在 AC-20C 层底、ATB-25 层底和水泥稳定碎石层底埋设竖向应变传感器，以监测各层竖向应变。传感器位于同一横断面上，埋设于车轮外侧轨迹线处，距道路边线 45 cm。

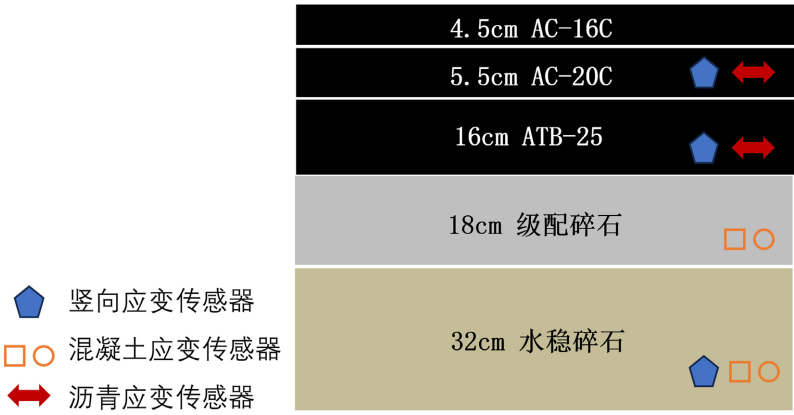


Figure 1. Diagram of pavement structure and sensor layout
图 1. 路面结构及传感器布置示意图

2.2. 沥青面层材料参数

试验路段沥青面层采用 SBS I-D 聚合物改性沥青，集料玄武岩 5 mm~10 mm、10 mm~15 mm 碎石，自加工石灰岩 0 mm~3 mm 机制砂、3 mm~5 mm 碎石。

沥青面层为 AC-16C 和 AC-20C 沥青混凝土，配合比设计结果如下表 1 和表 2：

Table 1. The gradation range of mineral aggregates for different asphalt mixtures
表 1. 不同沥青混合料矿料级配范围

混合料类型	通过下列筛孔(mm)的百分率(%)										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-16C	100	96.8	45.1	65.7	42.7	28.5	22.2	16.7	11.9	8.8	8.1
AC-20C	100	94.4	86.6	80.4	66.8	41.2	22.8	13.9	7.7	6.7	4.7

Table 2. Marshall test results of asphalt mixture under the optimal asphalt-aggregate ratio
表 2. 最佳油石比下沥青混合料马歇尔试验结果

混合料类型	最佳油石比 (%)	计算理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率 (%)	矿料间隙率 (%)	有效沥青饱和度 (%)	稳定度 (%)	流值 (%)
AC-16C	5.0	2.436	2.344	3.8	13.6	72.3	10.89	3.1
技术要求	/	/	/	3~5	≥13.5	65~75	≥8	2~4
AC-20C	4.5	2.553	2.452	4	13.2	70	14.16	3.62
技术要求	/	/	/	3~5	≥13	65~75	≥8	1.5~4

2.3. 传感器种类

(1) 沥青应变计

沥青应变计采用某公司生产的 DTC-100AS 沥青应变传感器，采集频率为 2000 Hz。其结构包含两个法兰，在这两个法兰上安装螺纹钢筋支腿，保证传感器在沥青路面材料中固定牢固。耐碾压、利于观测点位置固定及沥青材料握裹结合。在 AC-20C、ATB-25 层分别埋设 4 个沥青应变计，横向、纵向各布置 2 个。表面层 AC-16C 因离表面太近，在车辆荷载作用下容易发生损坏，故本次试验段未在表面层埋设传感器。

(2) 混凝土应变计

采用 DTC-100B 混凝土应变计动态测量水泥稳定碎石层与级配碎石层的应变情况，采集频率为 2000 Hz。测量电路采用惠斯通全桥电路，利用与形变体同步变形的弹性材料引起的电阻变化计算形变体的变形量。各结构层布置 4 个混凝土应变计，横向、纵向各布置 2 个。

(3) 竖向应变计

在沥青层与基层中埋设 DTC-50F 竖向应变计，可实现在动态条件下高频测量柔性路面的轴向应变，具有低模量和结构坚固的特点，能够承受在沥青铺设时所必然产生的高温、振动及碾压，采集频率为 2000 Hz。

2.4. 车辆加载方案

Table 3. Vehicle loading scheme
表 3. 车辆加载方案

试验方案序号	自变量	车辆总重/t	前轮轴重/t	后轮轴重/t	速度/km/h
1	速度	15	5	10	10
2					30
3					50
4					70
5					90
6	速度	10	3	7	30
7		15	5	10	
8		20	7	13	

为了测试沥青路面各结构层应变响应规律, 本文选取单后轴双轮组标准车作为测试车辆, 测试车辆的右轮于传感器正上方匀速行驶, 测试期间的气温保持在 $23^{\circ}\text{C}\sim 26^{\circ}\text{C}$, 因此未考虑温度变化对应变数据的影响, 为测试提供了相对稳定的外部条件。测试车辆分别以不同速度、不同载重的条件驶过传感器, 各方案的具体参数值如表 3 所示, 试验方案 1~5 的自变量为速度, 车辆分别以 10 km/h、30 km/h、40 km/h、70 km/h、90 km/h 的速度通过传感器正上方, 试验方案 6~8 的自变量为载重, 车辆总重分别为 10 t、15 t、20 t, 以 30 km/h 的速度通过传感器正上方, 每种方案加载 3 次, 取其动态响应结果的平均值作为试验结果。

3. 实车荷载下路面动态响应特征分析

通过对路面进行实车荷载测试, 采集各个结构层内传感器数据, 分析路面结构内部动力响应情况, 研究组合式柔性基层路面结构内部的应变在实际车辆荷载作用下时间和空间变化规律。

3.1. 车速对各结构层动态响应的影响

3.1.1. AC-20C 层底应变分析

AC-20C 沥青层底在不同速度下的应变情况如图 2~4 所示。随着车速的增加, 车辆荷载作用时间缩短, 导致横向应变、纵向应变和竖向应变均有不同程度的减小, 同时应变产生到恢复的时间也相应变短。30 km/h 时产生的横向应变、纵向应变和竖向应变的极大值分别是 90 km/h 的 1.35 倍、1.29 倍和 1.28 倍, 而 30 km/h 时的横向、纵向和竖向的响应时间分别是 90 km/h 的 1.8 倍、2.6 倍和 3.0 倍。从力学原理角度分析, 车速提高时, 车辆与路面之间的冲击力作用时间变短, 路面材料来不及充分变形, 应变值相应降低。

当车速在 30 km/h 以下时, 横向应变存在拉压交替变化情况, 在监测点位于车辆前后轴之间时, 横向应变出现由压变拉再变压的现象。当车速提升至 30 km/h 以上时, 产生的横向应变均为压应变。纵向应变的变化幅度明显大于横向应变, 且始终存在拉-压交替的变化状态, 拉应变极值明显小于压应变极值, 这是因为纵向方向上车辆荷载的传递更为直接, 路面结构在纵向方向上的连续性使得纵向应变更容易累积。

如图 4 所示, 车辆荷载在垂直方向上产生的应变主要为压应变, 但当车辆驶向传感器时, 会产生一个微小的拉应变, 且行驶速度越快, 产生的拉应变越小。总体来看, 竖向应变的变化趋势呈现先拉后压的规律, 当车辆驶向传感器位置时, 竖向应变曲线表现为受拉, 当车辆后轴驶至传感器上方时, 竖向应变出现极值。之后车辆驶离传感器, 应变曲线逐渐恢复至零, 但存在一定的残余变形, 这是由于沥青混合料具有黏弹性特征。车速越慢, 残余变形越大, 因此车辆在低速行驶状态下对路面结构造成的不利影响更大。

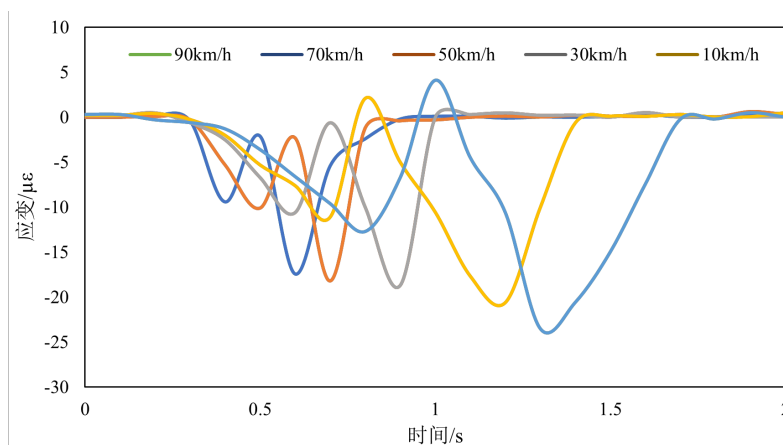


Figure 2. Time-history curve of transverse strain of AC-20C layer

图 2. AC-20C 层横向应变时程曲线

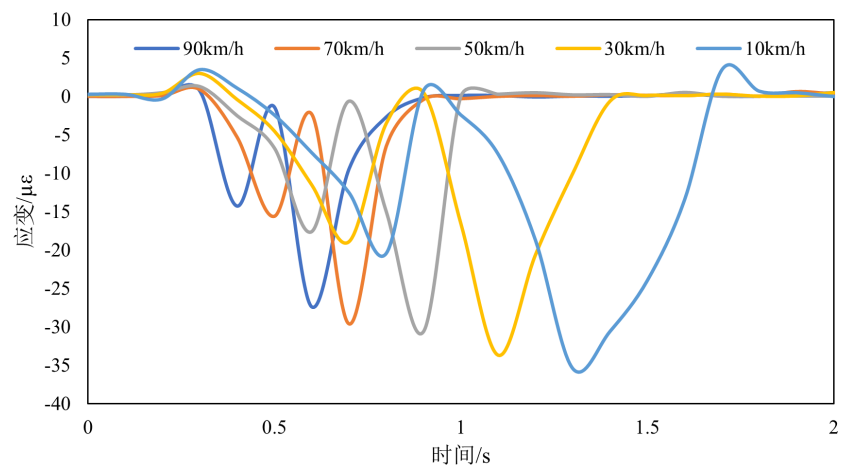


Figure 3. Time-history curve of longitudinal strain of AC-20C layer
图 3. AC-20C 层纵向应变时程曲线

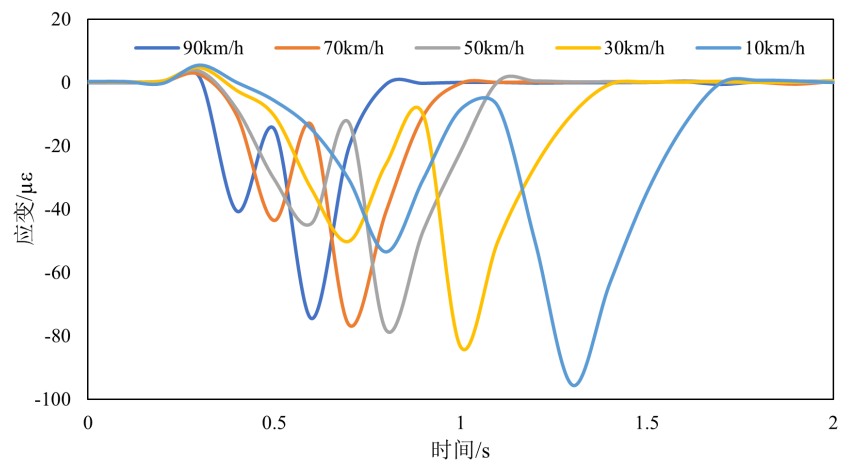


Figure 4. Time-history curve of vertical strain of AC-20C layer
图 4. AC-20C 层竖向应变时程曲线

3.1.2. ATB-25 层底应变分析

如图 5~7 所示，与 AC-20C 层底水平应变相比，ATB-25 层底水平应变以拉应变为主，应变幅度和响应时间随车速增加而降低，30 km/h 时产生的横向应变和纵向应变的极大值分别是 90 km/h 的 1.35 倍和 1.32 倍，而响应时间分别是 90 km/h 的 2.5 倍和 2.6 倍。横向应变和纵向应变的变化趋势基本相似，但横向应变的极值普遍小于纵向应变，且横向应变曲线中均为拉应变，纵向应变存在拉 - 压 - 拉的变化规律，拉应变的极值远大于压应变。产生差异的原因为车辆荷载传递路径差异，车辆行驶时，纵向是荷载传递的主要方向，路面结构在纵向具有较好的连续性，使得纵向应变更易累积。相比之下，横向方向荷载传递会受到路面结构横向分布特性的影响，如集料分布、层间结合等，其传递不如纵向直接，导致横向应变极值普遍小于纵向应变。横向由于侧向约束和材料特性，应变变化相对单一。而纵向方向上，路面结构受车辆行驶的直接作用，前后轮荷载的影响连贯，在车轮经过时，结构先受拉、再受压、后又受拉，形成拉 - 压 - 拉的变化规律。而横向方向上，路面结构两侧存在一定的侧向约束，限制了横向变形的发展，使得横向应变更倾向于拉应变，且极值相对较小。

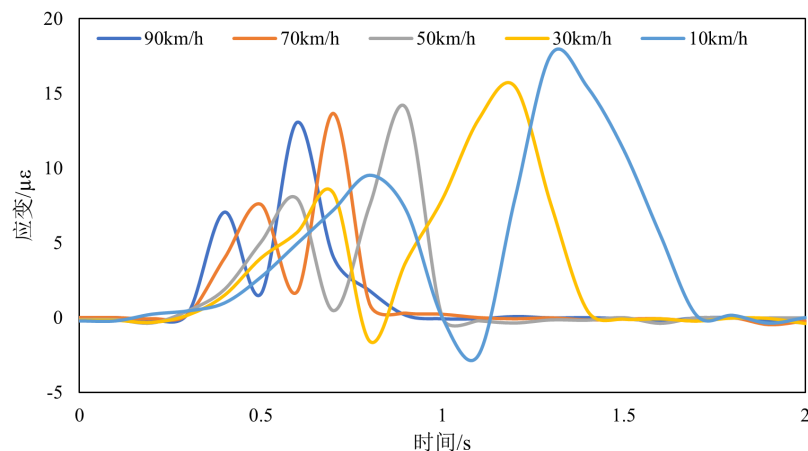


Figure 5. Time-history curve of transverse strain of ATB-25 layer

图 5. ATB-25 层横向应变时程曲线

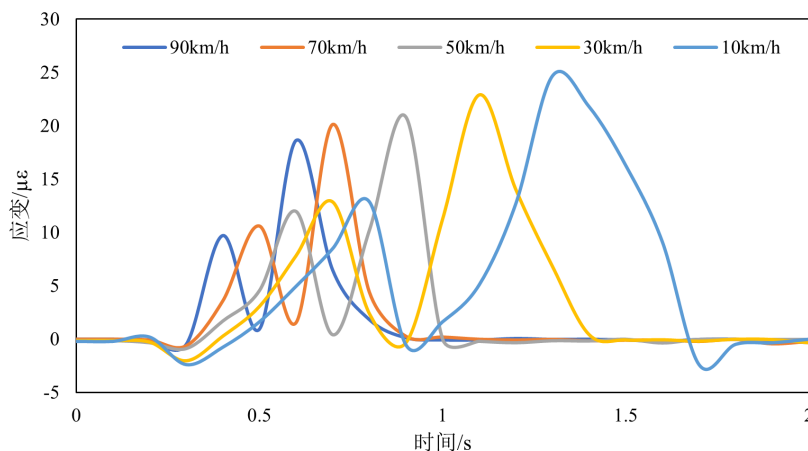


Figure 6. Time-history curve of longitudinal strain of ATB-25 layer

图 6. ATB-25 层纵向应变时程曲线

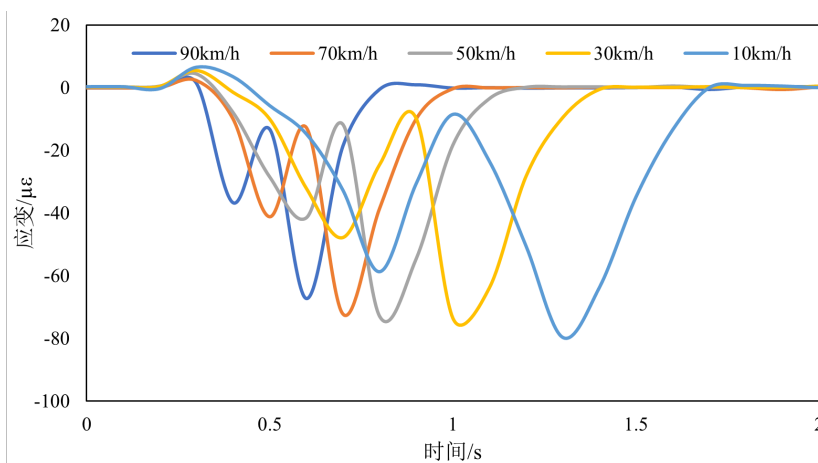


Figure 7. Time-history curve of vertical strain of ATB-25 layer

图 7. ATB-25 层竖向应变时程曲线

ATB-25 层底竖向应变的变化规律与 AC-20C 层底相似，均为先拉 - 后压的变化形式，随着车速的增

加，竖向拉应变的极值和响应时间呈明显下降趋势，30 km/h 时产生的竖向应变的极大值是 90 km/h 的 1.18 倍，而响应时间是 90 km/h 的 2.1 倍。

3.1.3. 级配碎石层底应变分析

如图 8、图 9 所示，级配碎石底部水平方向的应变极值与其他层位变化趋势一致，随着车速增加而降低，但应变响应幅度明显小于沥青层，从材料特性角度来看，级配碎石材料具有较好的颗粒级配和压实性能，在车辆荷载作用下，其变形能力相对较弱，底部的拉压应变都不明显，应变值随车速变化的幅度相对较小，证明级配碎石层拥有良好的应力消散作用，可作为良好的应力过渡层。

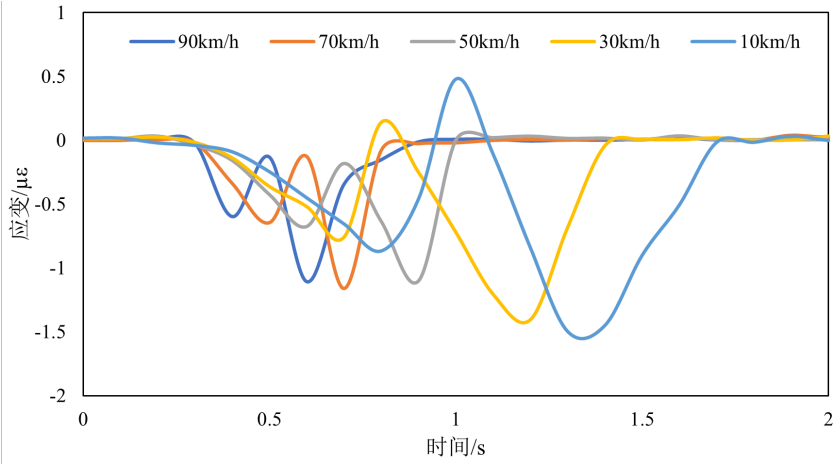


Figure 8. Time-history curve of transverse strain of graded crushed stone layer
图 8. 级配碎石层横向应变时程曲线

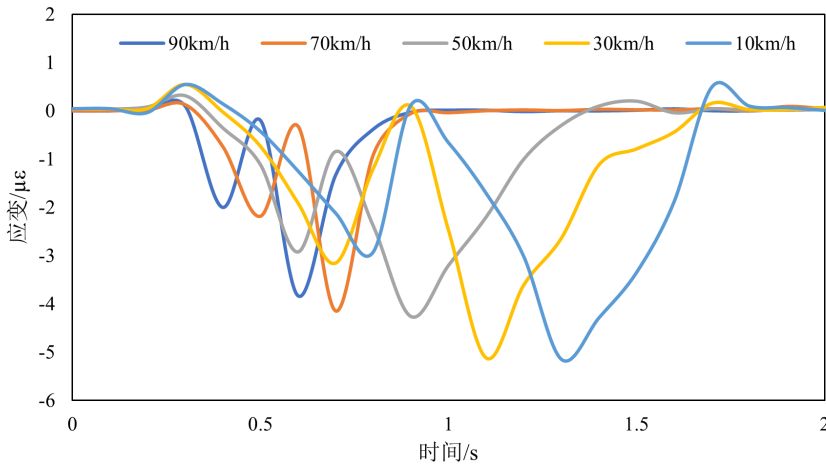


Figure 9. Time-history curve of longitudinal strain of graded crushed stone layer
图 9. 级配碎石层纵向应变时程曲线

3.1.4. 水泥稳定碎石层底部应变分析

如图 10~12 所示，水泥稳定碎石层底部的水平应变和竖向应变层的时程曲线与其他层位的变化规律基本相似，应变极值和响应时间均随车速增加而降低。这表明车速对基层应变的影响具有一致性。从材料力学角度来看，虽然层位较低，但水稳碎石基层具有较高的强度和刚度，对应力应变比较敏感，主要变形的形式为拉伸变形，且纵向的敏感性明显大于横向。

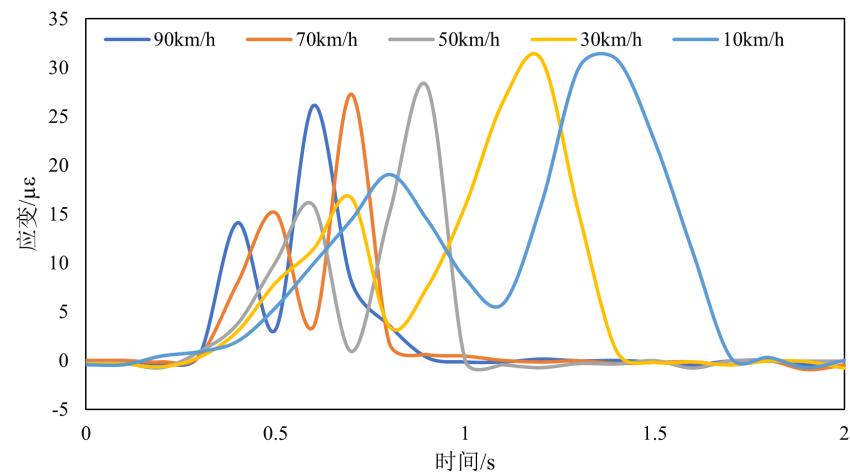


Figure 10. Time-history curve of transverse strain of cement stabilized macadam layer
图 10. 水泥稳定碎石层横向应变时程曲线

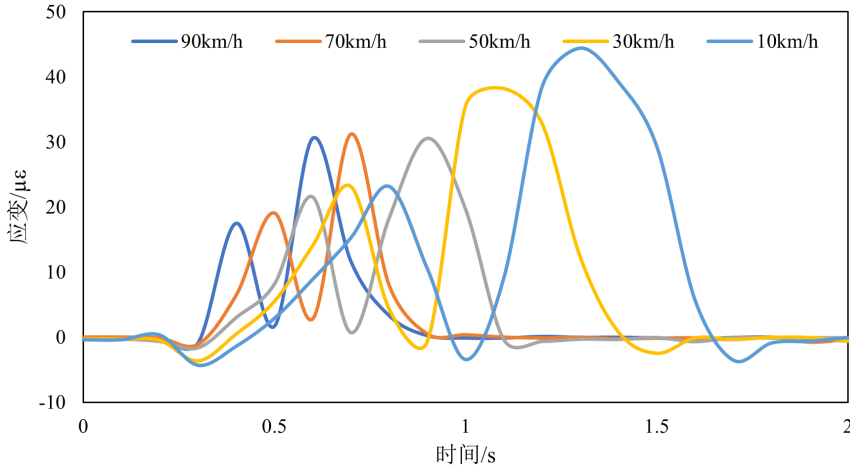


Figure 11. Time-history curve of longitudinal strain of cement stabilized macadam layer
图 11. 水泥稳定碎石层纵向应变时程曲线

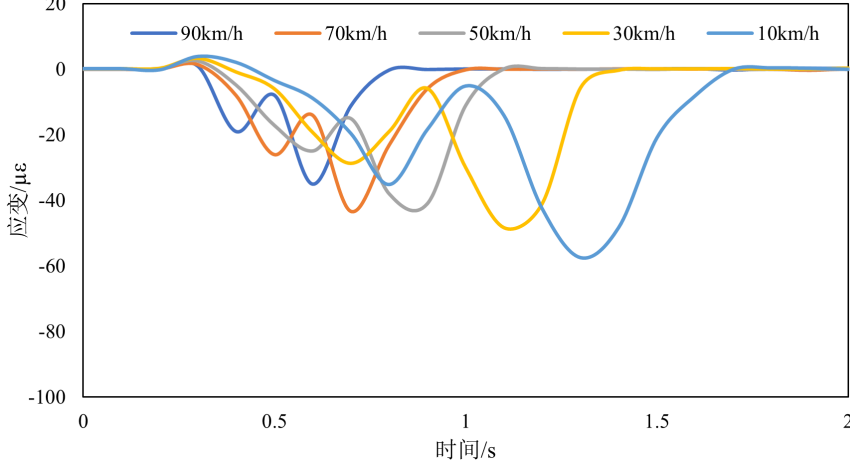


Figure 12. Time-history curve of vertical strain of cement stabilized macadam layer
图 12. 水泥稳定碎石层竖向应变时程曲线

3.2. 深度对各结构层动态响应的影响

以 30 km/h 为例, 分析各项响应与深度的关系, 横向应变、纵向应变与竖向应变的变化规律如图 13~15 所示。

横向应变极大值出现在 AC-20C 层底, 随着深度的增加, 应变逐渐减小, 这是因为深层结构受到的荷载传递相对较弱, 同时受到周围材料的约束更强。拉应变最大值出现在基层底部, 是由于基层底部距离路面荷载作用中心较远, 受到的约束相对较小, 更容易产生拉伸变形。

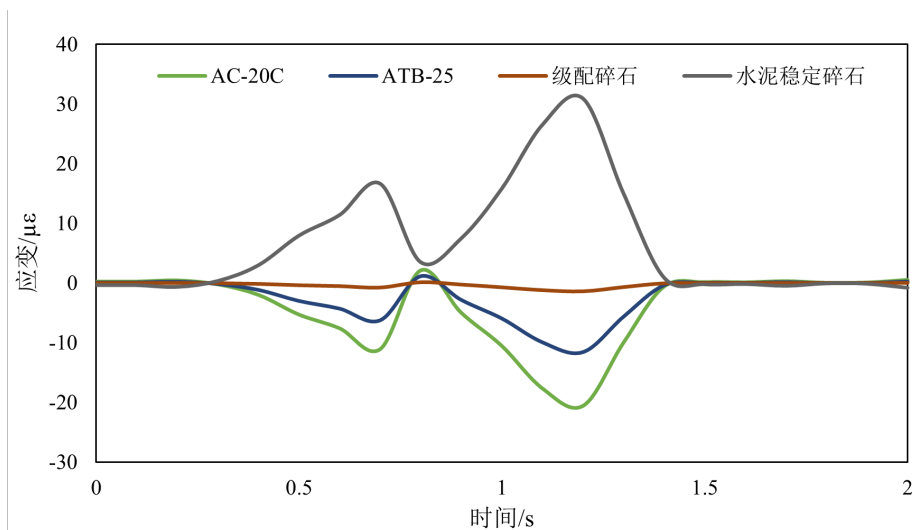


Figure 13. Time-history curves of transverse strain of each structural layer at different depths
图 13. 不同深度下各结构层横向应变时程曲线

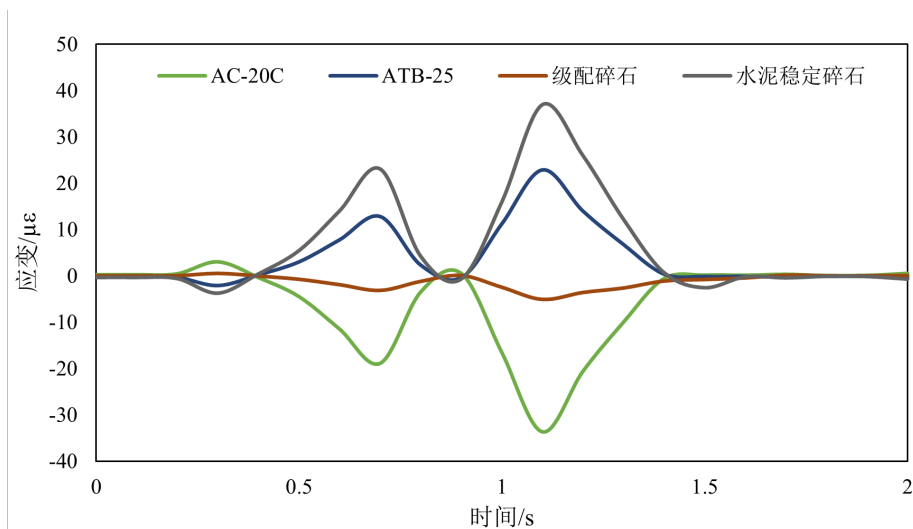


Figure 14. Time-history curves of longitudinal strain of each structural layer at different depths
图 14. 不同深度下各结构层纵向应变时程曲线

竖向应变在深度方向上主要取决于车辆荷载的垂直传递。AC-20C 层底的竖向压应变最大, 因为车辆荷载首先作用于上层结构, 使其承受较大的垂直压力。随着深度的增加, 竖向压应变呈逐渐减小趋势。AC-20C 层的最大压应变分别是 ATB-25 层和水泥稳定碎石层的 1.29 倍和 1.73 倍。

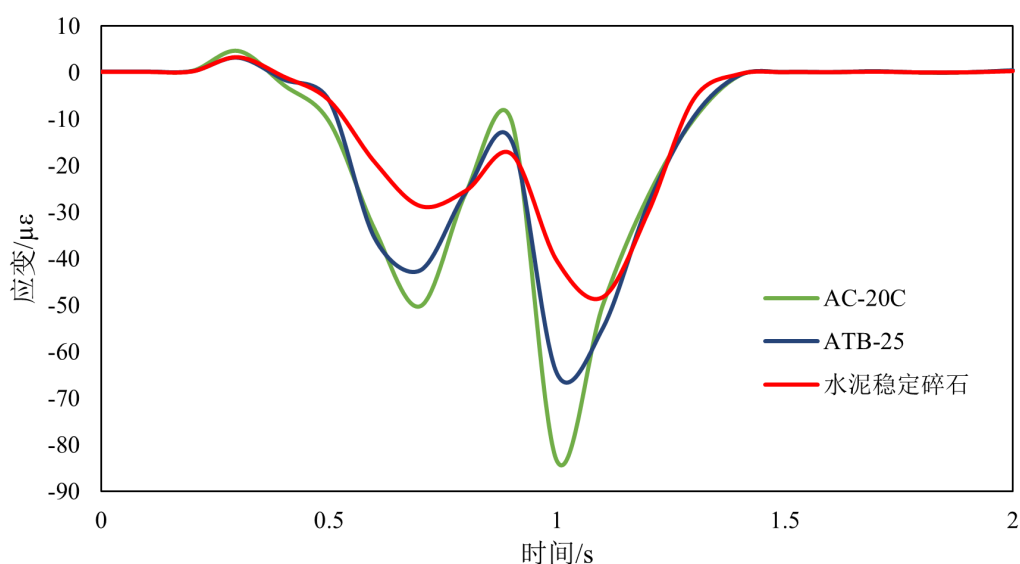


Figure 15. Time-history curves of vertical strain of each structural layer at different depths

图 15. 不同深度下各结构层竖向应变时程曲线

3.3. 力学响应与轴重关系

以 AC-20C 沥青层底部三向应变为例, 分析不同轴重对路面结构力学响应的影响, 如图 16~18 所示。当车辆以相同的行驶车速 30 km/h 通过测试路段时, 三向应变响应的极值随着轴重的增加而增加, 这是因为轴重越大, 车辆对路面施加的总荷载就越大, 使得路面受力更加显著, 从而引起应变增大。

因此, 路面超载行为必须严格控制, 以避免路面过早损坏, 延长路面的使用寿命。同时, 在路面设计和施工过程中, 应充分考虑轴重对路面力学响应的影响, 合理选择路面材料和结构设计参数, 以确保路面能够承受预期的车辆荷载。

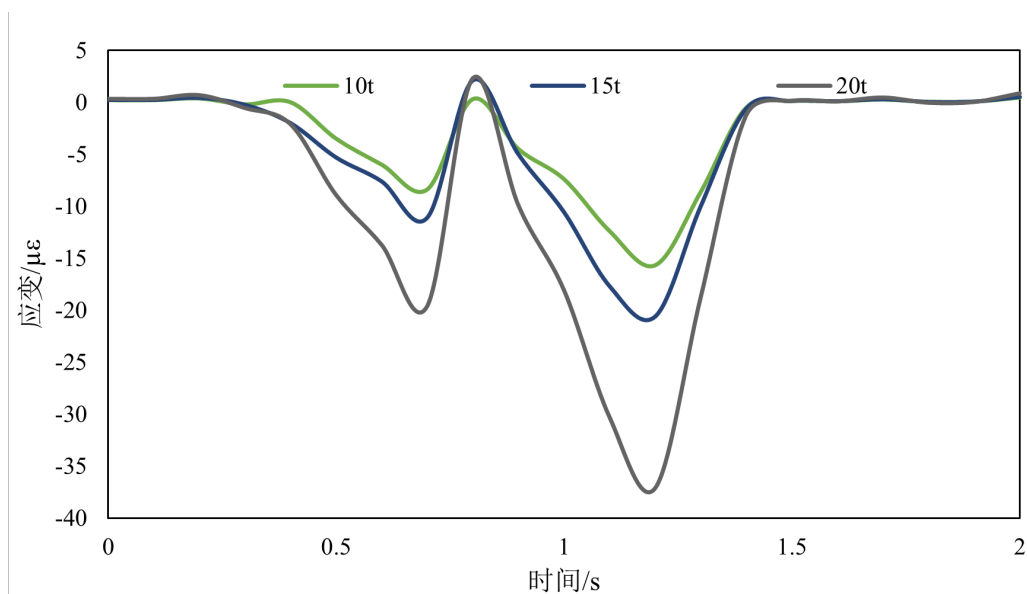


Figure 16. Time-history curves of transverse strain of AC-20C layer under different axle loads

图 16. 不同轴重下 AC-20C 层横向应变时程曲线

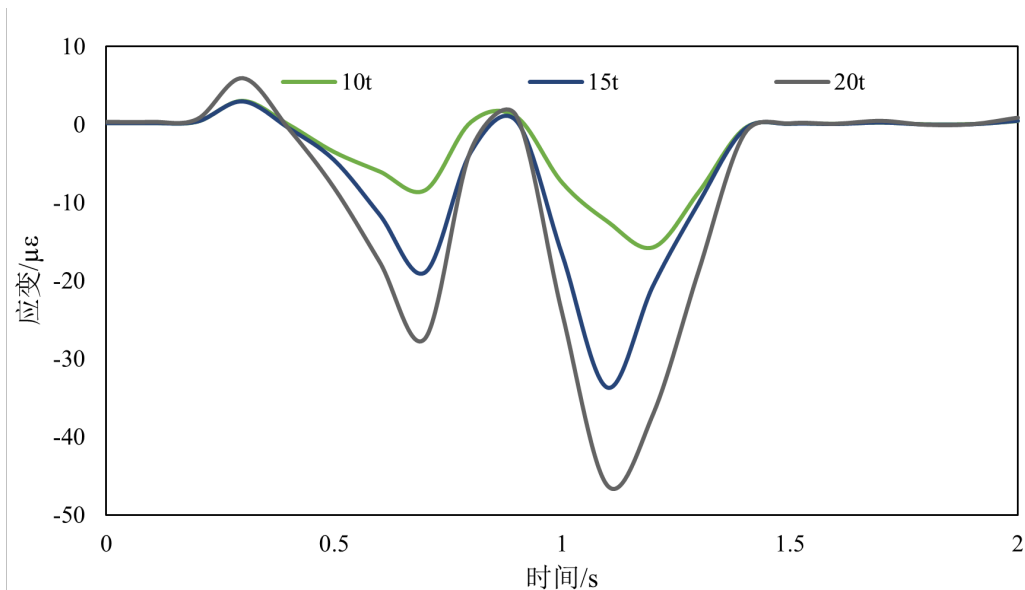


Figure 17. Time-history curves of longitudinal strain of AC-20C layer under different axle loads
图 17. 不同轴重下 AC-20C 层纵向应变时程曲线

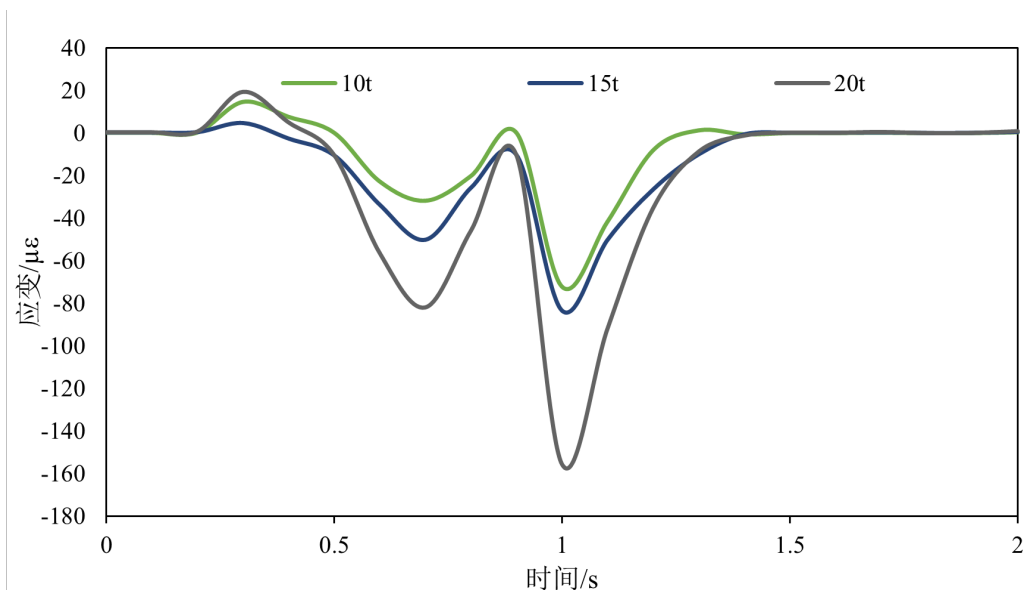


Figure 18. Time-history curves of vertical strain of AC-20C layer under different axle loads
图 18. 不同轴重下 AC-20C 层竖向应变时程曲线

4. 结论

(1) 车速对各结构层动态响应有显著影响。随着车速增加,各结构层的横向应变、纵向应变和竖向应变均不同程度减小。

(2) 深度对各结构层动态响应也有重要影响。横向应变和纵向应变在不同深度处变化规律相似,压应变最大值出现在 AC-20C 层底,拉应变最大值出现在水泥稳定碎石基层底部。竖向应变主要取决于车辆荷载的垂直传递,距离地表最近的 AC-20C 层底竖向压应变最大。而级配碎石层具有良好的应力消散作用,应变响应幅度明显小于其他结构层。

(3) 结构层各项应变对轴重的变化由较强的敏感性,轴重越大引起的应变响应就越大,因此,需对路面超载行为严格控制,延长路面的使用寿命。同时,在路面设计和施工过程中,应充分考虑轴重对路面力学响应的影响,合理选择结构设计参数。

参考文献

- [1] 潘勤学, 郑健龙, 杨博, 查旭东, 刘宏富. 沥青路面蠕变响应现场预估方法与试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 10-17.
- [2] 杨毅, 刘忠, 辛亚兵, 刘宏富, 瞿翔. 动载作用下半刚性基层沥青路面应变响应的演化规律[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 51-55.
- [3] 刘宁. 半刚性基层长寿命路面力学响应的现场测试与分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [4] Solaimanian, M., Stoffels, S.M., Yin, H., *et al.* (2009) Superpave *in-Situ* Stress/Strain Investigation Phase II Final Report Vol. I: Summary Report. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/17119>
- [5] Loulizi, A., Al-Qadi, I.L. and Elseifi, M. (2006) Difference between *in Situ* Flexible Pavement Measured and Calculated Stresses and Strains. *Journal of Transportation Engineering*, **132**, 574-579. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2006\)132:7\(574\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2006)132:7(574))
- [6] 陈凤晨, 谭忆秋, 董泽蛟, 柳浩, 王宝新. 基于光纤光栅技术的沥青路面结构应变场分析[J]. 公路交通科技, 2008(10): 9-12, 21.
- [7] 董忠红, 徐全亮, 吕彭民. 基于加速加载试验的半刚性基层沥青路面动力响应[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 1-5, 11.
- [8] 刘震, 顾兴宇, 任华. 基于MLS66 加速加载试验的半刚性基层沥青路面力学响应分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 114-122.
- [9] 杨永顺, 王林. 永久沥青路面设计方法研究[R]. 2008.
- [10] 董泽蛟, 柳浩, 谭忆秋, 等. 沥青路面三向应变响应现场实测研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(7): 46-51.
- [11] 陈少幸, 张肖宁. 沥青混凝土路面光栅应变传感器的试验研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(2): 396-399.
- [12] 李科. 基于光纤 Bragg 光栅技术的沥青路面动载测试分析的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [13] 赵延庆, 姜海峰, 王文松, 等. 超载作用下重载交通路面结构动力响应特[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 1-11.
- [14] 杨献章, 王岚, 陈华鑫, 等. 连续配筋混凝土路面与沥青加铺层间粘结性能试验[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(1): 34-41.
- [15] 张雨薇, 王选仓, 唐晶晶, 等. 道路结构动力响应及车载动力特性分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 16-23.