

考虑不平整激励下加铺沥青路面动力响应分析

程仁华

(福建省高速技术咨询有限公司,福建 福州 350007)

摘要: 为了分析改建的倒装式路面结构在静、动荷载作用下的力学响应,基于 Abaqus 软件对倒装式沥青路面所采用的加铺沥青路面方案建立模型,考虑不平整激励下的行车动荷载作用下,在不同行车速度时,通过旧沥青路面的沥青混凝土下面层(AC-20)的最大主应力、最大主应变、层底剪应力和剪应变,分析玄武岩纤维格栅在道路病害处治中的作用效果,并研究行车速度为 60 km/h 时,轮迹中心位置各路面结构层的弯沉规律。研究结果表明:加铺了玄武岩纤维土工格栅后,最大主应力、最大主应变、剪应力和剪应变减少约 10%~20%,在行车荷载下能改善路面弯沉,增加路面使用寿命。当时速为 60 km/h 时,最大主应力波谷值达到了波峰值的 81.03%,在结构层设计的时候,应考虑车辆在低速行驶时结构层所受的应力,以提高路面结构层的疲劳寿命。

关键词: 路面病害处治;玄武岩纤维格栅;应力吸收层;数值模拟

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0151-06

Dynamic Response Analysis of Overlaying Asphalt Pavement Considering Uneven Excitation

CHENG Renhua

(Fujian Provincial Expressway Technology Consulting Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: There is relatively little research on the dynamic behavior of inverted pavement structures after reconstruction. In this work, Abaqus software was used to establish a road model for the overlay asphalt pavement scheme applied to the inverted asphalt pavement in the project. Considering the dynamic vehicle load under uneven excitation, the bending and settlement law of each pavement structure layer at the center of the wheel track was analyzed when the vehicle speed was 60 km/h. At different driving speeds, the effect of basalt fiber grid in road disease treatment was evaluated by analyzing the maximum principal stress, maximum principal strain, shear stress and shear strain at the bottom of the asphalt concrete below layer (AC-20) of the old asphalt pavement. The research results show that after the basalt fiber grid is added, the maximum principal stress, maximum principal strain, shear stress and shear strain are reduced by approximately 10% to 20%, which can improve pavement deflection under traffic loads and extend the service life of the pavement. When the speed is 60 km/h, the trough value of the maximum principal stress at the bottom of the layer reaches 81.03% of the peak value. When designing the structural layer, the stress on the structural layer when the vehicle is driving at low speed should be considered to increase the fatigue life of the road structure layer.

Keywords: pavement disease treatment; basalt fiber grid; stress absorption layer; numerical simulation

倒装式沥青混凝土路面在福建应用广泛,具有使用寿命长、适应性强等优点,但随着大交通量下行车荷载和环境因素的不断作用,路面产生诸多病害。目前,对力学研究主要集中在新建的倒装式沥青混

凝土路面或新建、改扩建的半刚性沥青混凝土路面,对改建的倒装式路面结构的动力研究较少,力学响应不够清晰。

Dhakai 等^[1]对裂缝路面修补技术进行研究,在

旧路上摊铺碎屑密封剂或在旧路的裂缝上铺设织物成效良好,但铺设玻璃纤维格栅功效结果有好有坏。Shahb 等^[2]对在沥青面层中加入土工格栅后对其的影响进行了深入研究,土工格栅可减少裂缝宽度,从而降低了裂缝扩展速率。同样在降低裂缝扩展速度方面,玻纤格栅具有更高的模量,进而效果更好。房娜仁等^[3]运用 Abaqus 有限元软件对半刚性基层有无裂缝情况下沥青层底应力分布情况进行研究,得出反射裂缝初期受温度和荷载共同作用,后期主要受荷载作用为主。韩文扬等^[4]研究在不同车辆荷载、车速和沥青层厚度情况下的动力响应分析。孙昕^[5]采用有限元软件研究玄武岩纤维土工格栅在半刚性基层上的应用,结果表明此法能有效降低路面结构整体的应力应变分布,提高路面抗裂性能。邓滔等^[6]研究了在半刚性沥青混凝土路面铣刨后直接加铺沥青层或满铺玻纤格栅、双绞合钢丝网或玄武岩纤维格栅后再加铺沥青层 4 种方案进行比较,最终得出玄武岩纤维格栅和双绞合钢丝网对反射裂缝的处治效果优于玻纤格栅。

综上,国内外对土工格栅用于沥青面层内部和基层内以提高路用性能方面已有深入研究,但是土工格栅用于福建省推荐的倒装式沥青混凝土路面结构面层间的研究甚少,为便于后期运营阶段能短时间内处治完毕后开放交通,对土工格栅用于面层间的使用效果进行深入定量分析,本文基于福建某双向六车道高速项目,采用有限元软件模拟分析土工格栅用于倒装式沥青混凝土路面结构病害处治后,在静力荷载和汽车动荷载作用下的力学应力响应分析,以达到指导并验证病害处治方案的实施,为病害处治设计和养护提供思路。

1 工程处治方案及现场试验

福建某双向六车道高速已通车 6 年,沥青混凝土路面部分段落存在纵横向裂缝、坑槽和松散等病害,路用性能下降。为彻底解决该路段病害问题进而提高交通服务水平,亟需对该段沥青混凝土路面进行改造。

1.1 处治方案

该路所采用的倒装式路面结构类型为:4.5 cm 厚细粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-13)+5.5 cm 厚中粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-20)+16 cm 厚沥青稳定碎石上基层(ATB-25)+17 cm 厚级配碎石下基层+35 cm 厚 3% 水泥稳定碎石底基层。

本次对纵横向裂缝、坑槽和松散等病害的处治

方案有两种,方案一:采用铣刨 1 cm 厚旧沥青混凝土路面后,铺设玄武岩纤维土工格栅后,加铺 4.5 cm 厚细粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-13)+5.5 cm 厚中粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-20)处治方案。方案二:铣刨 1 cm 厚旧沥青混凝土路面后,直接加铺 4.5 cm 厚细粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-13)+5.5 cm 厚中粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-20)处治方案,具体方案结构图见图 1,参数如表 1 所示。

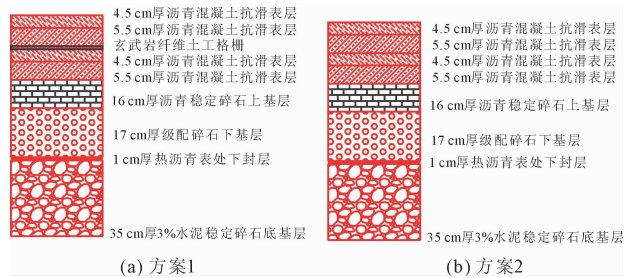


图 1 方案结构图

表 1 倒装式路面结构静态模量参数表

结构层位	材料	厚度/cm	泊松比 μ	静态模量/MPa	动态模量/MPa
加铺新罩面	细粒式改性沥青混凝土(AC-13)	4.5	0.25	1600	10000
	中粒式改性沥青混凝土(AC-20)	5.5	0.25	1500	12000
	玄武岩纤维格栅	0.6	0.45	6000	6000
旧路面结构	细粒式改性沥青混凝土(AC-13)	4.5	0.25	1600	8000
	中粒式改性沥青混凝土(AC-20)	5.5	0.25	1500	10000
	沥青稳定碎石(ATB-25)	16.0	0.25	1300	9000
	级配碎石	17.0	0.35	500	500
	3% 水泥稳定碎石	35.0	0.25	1400	12000
	土基		0.35	50	50

1.2 现场试验

在旧沥青路面的下面层(AC-20)结构内部埋入光纤光栅传感器,实现对下面层随机车辆荷载作用下的的层底应变的适时采集、处理与分析,对该处的应变进行监测,可知日交通量下面层内部动力响应情况,如图 2 所示。

由图 2 可知,随机日交通车辆荷载作用下,方案一下面层的层底应变主要分布 $3 \mu\epsilon \sim 4 \mu\epsilon$,方案二下面层的层底应变主要分布 $4 \mu\epsilon \sim 5 \mu\epsilon$,表明方案一铺设玄武岩纤维土工格栅后,下面层所受应变降低,处治效果较好,可为改建或养护项目做技术

储备。

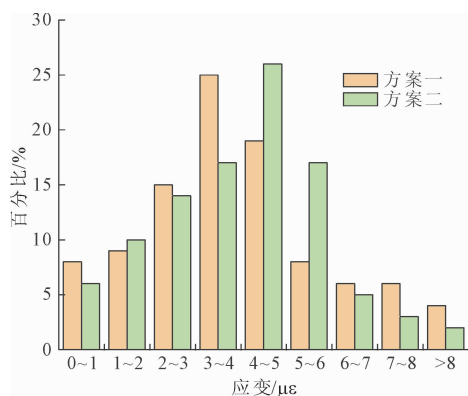


图 2 不同方案动力作用下应变结果

2 建模典型结构及其参数确定

随着道路的高速发展,福建省针对南方湿热地区的道路进行了专项研究,最终采用倒装式路面结构类型,本文采用有限元软件 Abaqus 对是否铺设玄武岩纤维土工格栅的倒装式结构病害处治所采用的方案进行数值模拟,并对其结构进行力学响应分析。

2.1 模型建立

本体系由弹性层状体系组成,假设其各层均匀连续且各向同性的线弹性体,层间为不发生滑移的完全连续状态,不考虑温度对模型的影响,仅考虑荷载作用,玄武岩纤维土工格栅与其上下层结构之间均为不相对滑动的完全连结^[7-8]。

标准轴载和行车动荷载作用下的路面三维模型的宽度×厚度×深度尺寸为 10 m×30 m×150 m,面层宽度为 6 m,面层网格划分时全局种子布局取 0.1,其余层取 0.5,阻尼比取 0.05。玄武岩纤维土工格栅为厚度较薄的平面网状结构,本次模拟采用四节点薄膜单元来模拟,其余结构层采用八节点三维块体单元,为更真实的模拟实际情况,土工格栅与上下层之间采用接触单元联系成整体。模型的网格划分为 C3D8R 网格积分单元^[9],模型如图 3 所示。

2.2 加载类型

2.2.1 标准轴载

路面的主要功能就是确保车辆安全、快速、稳定地行驶,因此车辆荷载不单是造成路面结构损毁或损伤的主要因素,更是其他路面病害的重要诱因。《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中规定路面设计采用双轮组单轴荷载作为标准荷载,以 BZZ-100 表示。标准荷载采用双轮组单轴荷载为 100 kN,取 $p=0.7$ MPa。

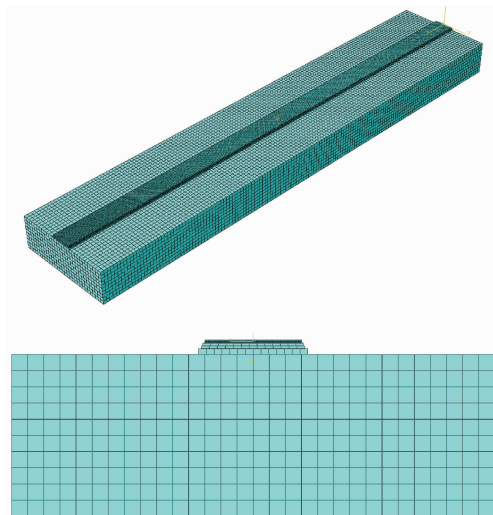


图 3 模型网格划分图

2.2.2 行车荷载

道路所受的行车动荷载与传统的静荷载不同,是方向、位置和大小随时间不断变化,为准确模拟处治后的路面在实际行车荷载下的力学响应情况,应首先建立车辆与道路的耦合模型^[10],在此基础上得到车路耦合荷载,将此荷载作为处治后路面结构所受的实际行车动荷载,以此方式进行受力模拟与实际情况较贴切。在车路耦合模型中,将路面不平度作为车辆模型的荷载条件,本文采用考虑 B 级路面平整度的计算得到车路耦合荷载^[11-12]。本文路面不平度根据规范中给出的 B 级不平度功率谱利用傅里叶逆变换计算得到^[13],如图 4 所示。功率谱密度对比如图 5 所示,可见得到的功率谱密度数值与标准值完全相同,证明了行车动荷载模拟的准确性,可以供计算使用。

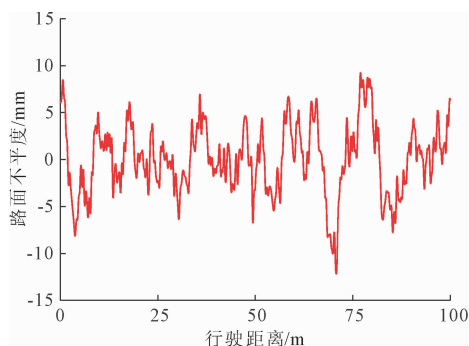


图 4 路面不平度图

车路耦合模型中选取车速为 60 km/h、75 km/h、90 km/h 和 120 km/h,车重为 10 t,加载车辆前轴和后轴的轴距为 5 m,轮轴上轮胎的轮距为 3 m,模拟车辆的轮轴中点位置沿着道路纵向中心线方向行

驶,计算得到 90 km/h 时车路耦合荷载如图 6 所示,其他速度情况下的车路耦合荷载在此不再赘述。

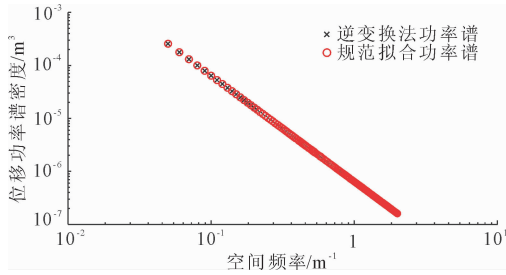


图 5 傅里叶逆变换法功率谱密度对比图

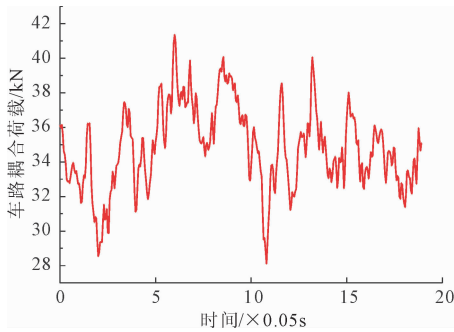


图 6 车路耦合荷载图

3 数值模拟结果分析

3.1 模型计算结果验证

通过有限元软件对方案一进行数值模拟,在标准荷载作用下,结构竖向弯沉 U2 结果如图 7 所示。同时采用壳牌公司研发的路面专业计算软件 Bisar3.0 对方案一进行计算^[14],将得到的结果进行对比分析。

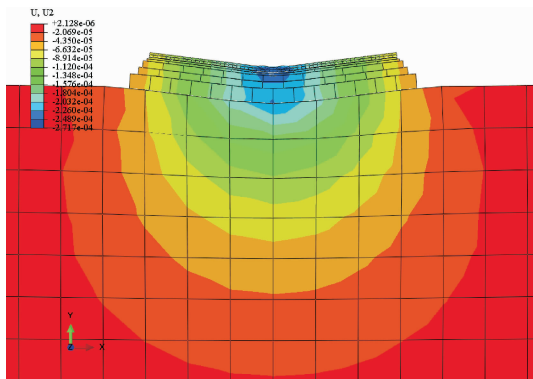


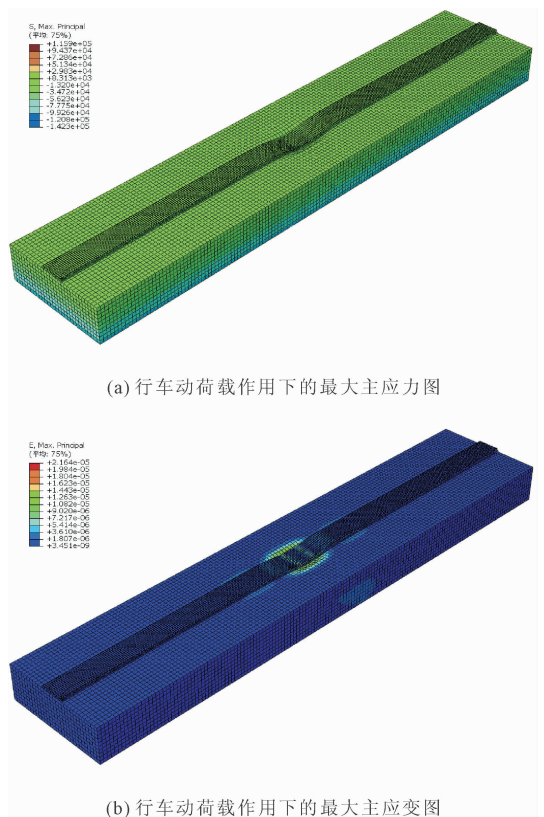
图 7 方案一弯沉计算结果

从图 7 可知,在铺设玄武岩纤维土工格栅,加铺沥青混凝土面层后,旧沥青路面的中粒式改性沥青混凝土下面层(AC-20)下部轮迹中心位置处的竖向弯沉 U2 最大值为 -0.238 mm, Bisar3.0 运算结果

为 -0.2615 mm,二者计算结果相近,仅相差 9%,说明两个软件计算的弯沉结果误差在可接受范围,采用 Abaqus 对改造方案所建立的模型计算效果较为理想^[15],可继续进一步深入数值模拟研究。

3.2 动载作用力学分析

通过行车动荷载作用的车路耦合模型,在行车速度为 60 km/h 时,得到两种不同的病害处治方案在行车动荷载下的弯沉,在行车速度为 60 km/h、75 km/h、90 km/h 和 120 km/h 时,分析动荷载作用下的道路模型力学响应,得出玄武岩纤维格栅在道路病害处治中的作用效果。图 8 为行驶速度为 90 km/h,时间增量步为 2.9 s 时的模型力学响应图。



(a) 行车动荷载作用下的最大主应力图

(b) 行车动荷载作用下的最大主应变图

图 8 行车动荷载作用下力学响应图

3.2.1 动载作用下不同方案的弯沉分析

通过模型计算在行车速度为 60 km/h 时,得到两种不同的病害处治方案在行车动荷载作用下,车轮轮迹中心位置竖向不同深度的各路面层的弯沉值,计算结果如图 9 所示。

由图 9 可知,在行车速度为 60 km/h 时,在车轮中心下各层的弯沉值随深度的增加而逐渐减小,最大值在加铺 4.5 cm 厚细粒式改性沥青混凝土抗滑表层(AC-13)表面处,在水泥稳定碎石层产生弯沉

突减后,最终在土基内趋于0。在面层顶面,方案一弯沉最大值为 $-24.37(0.01\text{ mm})$,较方案二小1.44%。在深度为10.6 cm处为方案一中铺设玄武岩纤维土工格栅底部,该处弯沉值为 $-24.14(0.01\text{ mm})$,较方案二10 cm深度处小1.56%,说明在行车荷载下,方案一中的处治方案能改善路面弯沉,增加路面使用寿命。

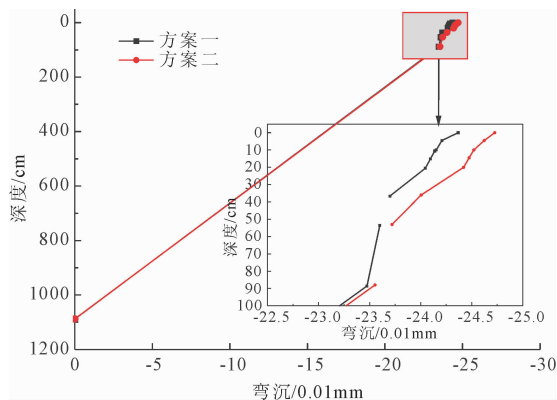


图9 不同处治方案下的弯沉值

3.2.2 不同行车速度作用下的力学分析

通过模型计算不同时速条件下病害处治下的道路结构的各设计指标变化规律,选取模型纵向向中间位置横断面,取该断面行车动荷载轮胎的中心位置,分析旧沥青路面的中粒式改性沥青混凝土下面层(AC-20)的层底最大主应力和最大主应变随行车荷载过程中的变化情况,计算结果如图10所示。

由图10(a)、图10(b)可看出,随着车速的增加,旧沥青路面下面层的最大主应力和最大主应变均越大。沥青层的最大主应力值均小于15 kPa,当时速为60 km/h时,层底最大主应力波谷值达到了波峰值的81.03%,当时速为120 km/h时,层底竖向应力波谷值达到了波峰值的54.95%,故在结构层设计的时候,应考虑车辆在低速行驶时结构层所受的应力,以提高路面结构层的疲劳寿命。当时速为75 km/h时,较时速60 km/h时结构层底最大主应力(9.06 kPa)大10.48%,最大主应变大0.048 $\mu\epsilon$;时速90 km/h时,较时速75 km/h结构层底最大主应力大14.6%,最大主应变大0.114 $\mu\epsilon$,时速120 km/h时,较时速90 km/h结构层底竖向应力大19.3%,层底竖向应变大0.258 $\mu\epsilon$ 。路面结构在车辆开始作用时内部应力和应变逐渐增大,车辆行驶过后弯沉值不断减小,并在离开的一小段时间内,应变以0为基准点上下波动,最后趋于0。

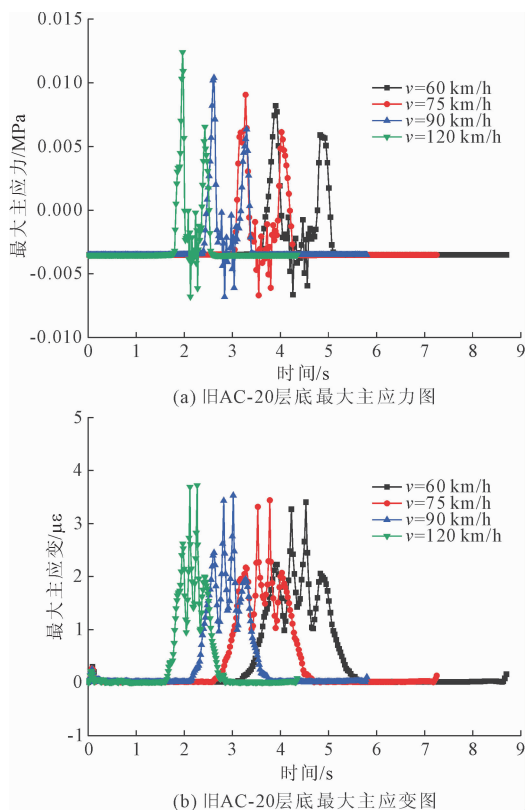


图10 不同行车速度数值模拟计算结果

3.2.3 不同处治方案作用下的力学分析

通过模型计算相同时速60 km/h下不同处治方案时,道路结构应力应变的变化规律,选取模型纵向向中间位置横断面,取该断面行车动荷载轮胎的中心位置,分析旧沥青路面的中粒式改性沥青混凝土下面层(AC-20)的层底最大主应力、最大主应变、剪应力和剪应变随行车荷载过程中的变化情况,计算结果如图11所示。

由图11可看出,层底最大主应力、最大主应变、剪应力和剪应变随着行车速度的增大呈增加趋势。当时速为60 km/h时,方案一层底最大主应力、最大主应变、剪应力和剪应变分别为8.2 kPa、3.27 $\mu\epsilon$ 、31.3 kPa和6.78 $\mu\epsilon$,各参数较方案二分别小16.7%、16.8%、27.7%和22.5%,当时速为120 km/h时,方案一层底最大主应力、最大主应变、剪应力和剪应变分别为12.4 kPa、3.69 $\mu\epsilon$ 、34.3 kPa和7.44 $\mu\epsilon$,各参数较方案二分别小11.2%、14.7%、27.2%和21.9%,这与现场试验数据结果相符。故方案一加铺了玄武岩纤维土工格栅后,可使旧AC-20层的最大主应力、最大主应变、剪应力和剪应变减少约10%~20%,有效的改善路面沥青层内的应力分布,提高路面结构的整体性能。

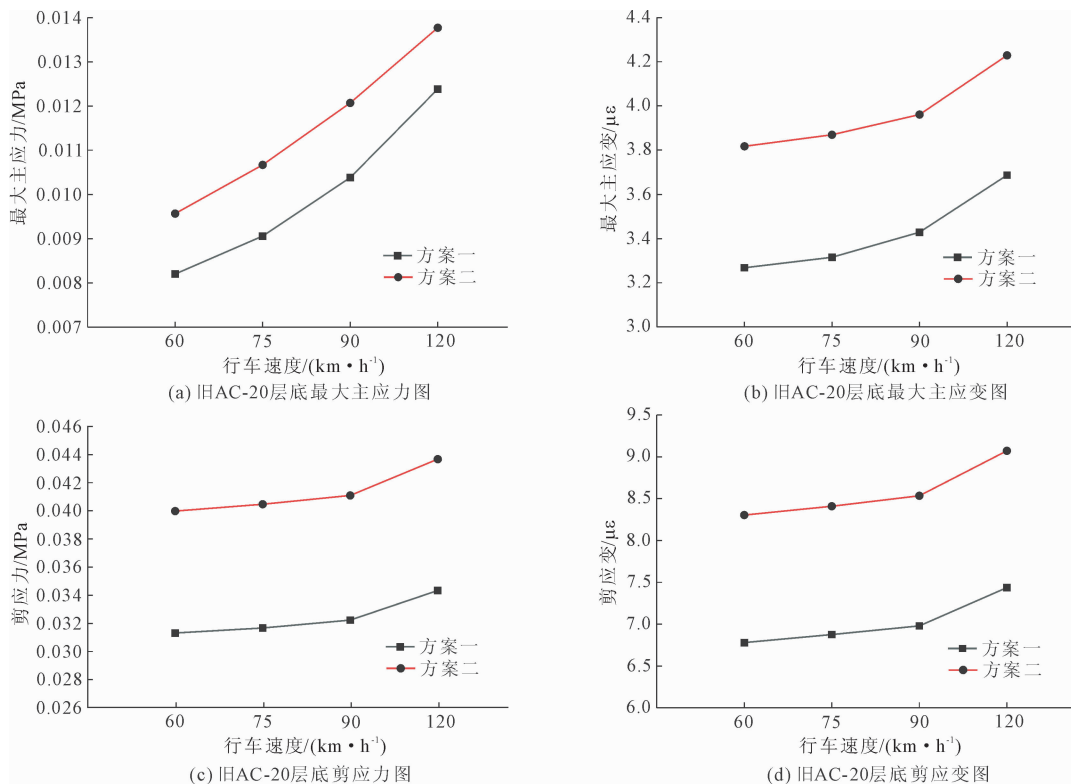


图 11 不同方案和速度的数值模拟计算结果

3.3 使用效果

依托高速项目采用方案一进行改造,已通车运营至今接近 2 年,现场路面整体表现较好,未发现路面裂缝、车辙或其他病害,如图 12 所示。



图 12 运营期路面现状

4 结 论

本文依托项目对裂缝、坑槽和松散等病害的两种处治方案进行数值模拟,研究不同处治方案下路面结构动力响应规律,得到以下结论:

(1) 在行车速度为 60 km/h 时,在车轮中心下各层的弯沉值不断减小,在水泥稳定碎石层产生弯沉突减后,最终在土基内趋于 0,层底最大主应力波谷值达到了波峰值的 81.03%,处治方案一在行车

荷载下能改善路面弯沉,增加路面使用寿命,在结构层设计的时候,应考虑车辆在低速行驶时结构层所受的应力。

(2) 在行车动荷载下,方案一可使旧 AC-20 层的最大主应力、最大主应变、剪应力和剪应变减少约 10%~20% 左右,有效改善路面沥青层内的应力分布,提高路面结构的整体性能。

(3) 处治段落内未发现路面破损,方案一铺设玄武岩纤维土工格栅后,下面层所受应变降低,处治效果较好,可为改建或养护做技术储备。

参考文献:

- [1] Dhakal N, Elseifi M A, Zhang Z. Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements – A synthesis[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2016,9(3):228-239.
- [2] Fallah S, Khodaii A. Reinforcing overlay to reduce reflection cracking; an experimental investigation[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015,43(3):216-227.
- [3] 房仁娜,胡士清,吴朝玥,等. 半刚性基层开裂后沥青路面寿命预估方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(10):45-52.

(下转第 187 页)

- 压强度影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9):11-15.
- [7] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等. 密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2006, 4(3):54-58.
- [8] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7):1996-2000.
- [9] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 不同结构土壤固化剂集流面的力学与集流性能研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(7):224-228, 234.
- [10] 张星辰,高建恩,樊恒辉,等. 纳米土壤固化剂重构黄土力学性能的试验研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(06):131-137, 143.
- [11] Zhang Xingchen, Gao Jianen, Fan Henghui, et al. Study on the mechanism of nano-SiO₂ for improving the properties of cement-based soil stabilizer[J]. Nanomaterials, 2020, 10(3):405.
- [12] 郭昊炜. 水泥基固化土在高标准农田道路工程建设中的应用[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024.
- [13] 龙开荃,方祥位,申春妮,等. 复合型早强土壤固化剂固化淤泥强度特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1):309-318.
- [14] 褚 锋,曹敬光,郑兆丰,等. 复合类固化剂固化黏土的力学行为及加固机理[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(21):9203-9209.

(上接第 156 页)

- [4] 韩文扬,祝 丽,韦金城,等. 基于车辆加载实验的沥青路面动力响应分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9):130-135.
- [5] 孙 昕. 玄武岩纤维土工格栅加筋半刚性基层结构设计方法研究[D]. 西安:长安大学, 2022.
- [6] 邓 滔,杨 梦,宋 涛. 机场高速公路沥青路面大修改造试验研究[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(4):82-85.
- [7] 胡洪溪,胡 朋,赵兴奎,等. 基于有限元的复合水泥混凝土路面层层底应力分析与结构设计[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(4):39-48.
- [8] 张 万,刘永超,李 波. 大温差地区沥青路面温度应力的累计效应分析[J]. 公路, 2025, 70(2):1-7.
- [9] 郭赵元,闵召辉,林郭锋,等. 耐久性环氧沥青路面结构有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(19):8280-8289.
- [10] 吴荻非,刘成龙,覃伯豪,等. 基于车辆参数估计的振动式路面平整度检测标定方法[J]. 中国公路学报, 2025, 38(1):31-45.
- [11] 张献民,刘小兰. 汽车动载对沥青路面作用深度的影响研究[J]. 中外公路, 2016, 36(2):45-49.
- [12] 龙金喜,朱尚清,荚瑞馨,等. 车桥耦合振动的车轮多点接触模型与试验验证[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, 48(4):555-562.
- [13] 杜 峰,葛晓成,陈 翔,等. 路面功率谱密度换算及不平度建模理论研究[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5):981-998.
- [14] 杜宇兵,邹晓翎,阮鹿鸣,等. 基于灰色关联理论的沥青薄层罩面层间剪应力影响因素研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3):57-62.
- [15] 刘春阳. 基于减小高速公路底基层弯沉的低液限粉土改性试验研究[D]. 济南:山东大学, 2019.