

CRC + AC复合式路面热力耦合下动力响应分析

邓凤祥¹, 许路凯², 孙煜³, 李盛³

¹湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙

²河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州

³长沙理工大学特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年7月5日; 发布日期: 2022年7月20日

摘要

为研究热力耦合下CRC + AC复合式路面结构的力学响应, 利用ABAQUS有限元软件, 在进行力学分析时, 通过定义预定义场的方式将温度条件输入到路面应力模型中, 从而模拟路面在温度与荷载应力耦合作用下的动响应, 深入了解沥青路面的破坏机理, 分析沥青路面在温度和荷载应力的耦合作用下其内部应力应变的分布特性及变化规律。研究结果表明: 在温度作用下沥青层受到拉应力和剪应力, 荷载和温度共同作用下沥青层转为受压应力和剪应力; 在车辆荷载作用下, CRC层顶面受到较大的拉应力和剪应力, 且随着轴重增加CRC层顶面受到的剪应力增加; 随着沥青层厚度增加, AC层底面横向和纵向压应力逐渐减小, 有转变为拉应力的趋势, AC层顶面横向剪应力逐渐增大, 底面横向剪应力则减小; 降温主要对横向和纵向应力影响较大, 降温越大横、纵向拉应力越大, 对剪应力影响较小, 且降温对CRC层横向和纵向应力的影响更大。

关键词

CRC + AC复合式路面, 有限元, 热力耦合, 动力响应, 数值模拟

Dynamic Response Analysis of CRC + AC Composite Pavement under Thermal Coupling

Fengxiang Deng¹, Lukai Xu², Yu Sun³, Sheng Li³

¹Hunan Communications Research Institute Co., Ltd., Changsha Hunan

²Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan

³Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

Abstract

In order to study the mechanical response of the CRC + AC composite pavement structure under thermal and mechanical coupling, the ABAQUS finite element software is used to input the temperature conditions into the pavement stress model by defining a predefined field during mechanical analysis, thereby simulating the temperature of the pavement. Dynamic response coupled with load and stress, deeply understand the failure mechanism of asphalt pavement, and analyze the distribution characteristics and change law of internal stress and strain of asphalt pavement under the coupling effect of temperature and load stress. The research results show that under the action of temperature, the asphalt layer is subjected to tensile stress and shear stress, and under the combined action of load and temperature, the asphalt layer turns into compressive stress and shear stress; under the action of vehicle load, the top surface of the CRC layer is subject to greater tensile stress and shear stress, and as the axle load increases, the shear stress on the top surface of the CRC layer increases; as the thickness of the asphalt layer increases, the transverse and longitudinal compressive stresses on the bottom surface of the AC layer gradually decrease, and there is a tendency to transform into tensile stress, the transverse shear stress on the top surface of the AC layer gradually increases, and the transverse shear stress on the bottom surface decreases; cooling has a great impact on the transverse and longitudinal stress, the greater the cooling, the greater the transverse and longitudinal tensile stresses, and the smaller the impact on the shear stress. Compare with AC layer, the cooling has a greater impact on the transverse and longitudinal stresses of the CRC layer.

Keywords

CRC + AC Composite Pavement, Finite Element, Thermo-Mechanical Coupling, Dynamic Response, Numerical Simulation

Copyright © 2022 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

CRC + AC (Continuously Reinforced Concrete + Asphalt Concrete)复合式路面是在连续配筋水泥混凝土路面上铺筑沥青混合料的一种复合式路面结构,能够在重载交通情况下,提供较好的路用性能,并在较长使用期内不发生结构性破坏,只需对沥青混合料面层进行养护,具有长寿命的特点[1]。

国内外有很多关于路面结构动力响应的研究。Borros 等人推导得到了层状黏弹性半空间体在匀速移动点荷载和线荷载作用条件下的动态响应解[2]。邓学均、黄大强通过结合有限元和无限元,推导出半正弦荷载作用下的动态响应理论解[3]。Olsson 分别使用理论解析法和有限元法计算路面在移动荷载作用下的力学响应,对比结果显示有限元法更适合计算路面力学响应问题[4]。Van Metzinger 等人研究了刚柔复合式路面钢筋类型、沥青层厚度和骨料类型对沥青层横向裂缝的影响,提出了沥青层厚度的设计方法[5]。Sameh Zaghrou 使用 ABAQUS 有限元软件计算路面结构在移动荷载下的动力响应,计算结果与实际测量得到的数据较为吻合,表明有限元方法的准确性[6]。Vetter 等人计算了 CRC + AC 复合式路面结构在接缝处的传荷能力,得到了沥青层中垂直与水平应力、最大弯沉和最大剪应力[7]。李江通过建立路面结构

应力随速度变化的路面模型,得出应力随着行车速度减小而线性增加,刹车频繁的区域水平应力会更大[8]。董泽蛟采用实测车辆轴载数据,建立三向非均布移动荷载有限元模型,输入实测沥青混合料的动态模量,研究表明荷载移动作用下路面结构应力呈波动性变化,剪应力主要出现在路面的中面层[9]。乔建刚等采用兼有半刚性基层的强度和柔性基层的韧性的半柔性基层作为沥青路面基层,结果表明,半柔性基层沥青路面可以有效抑制基层反射裂缝的产生和发展[10]。此外还有一些有关热力耦合的研究。马连湘等用 ADINA 软件实现了轮胎的热力耦合有限元分析模型,并对计算结果进行了分析[11]。田荣燕、黄晓明基于水-热-力耦合作用理论,利用 COMSOL 有限元软件建立了冻土区连续配筋混凝土路面有限元模型,对影响 CRCP 路面结构组合应力的因素进行分析,并提出了适用于多年冻土区 CRCP 路面的合理结构形式[12]。

国内外有较多的路面结构力学响应研究和热力耦合理论与有限元计算,但是关于道路工程领域 CRC + AC 复合式路面热力耦合下的动力响应研究较少,进行热力耦合下 CRC + AC 复合式路面的动力响应研究对指导 CRC + AC 复合式路面施工有一定意义。

2. 模型建立

2.1. 模型尺寸与边界条件

由于尺寸效应模型应尽可能的大,但模型尺寸过大计算效率过低,因此路面结构模型宽(沿 x 轴)取 7.5 m (双车道),沿行车方向(沿 y 轴)取 7.5 m、深度方向尺寸取 10 m。路面结构为 40 cm 水稳碎石 + 24 cm 连续配筋水泥混凝土层 + 8 cm 沥青层,层间连续,路面结构层参数如表 1 [1]。有限元模型如图 1。CRC 板纵向钢筋采用直径 16 mm 螺纹钢,配筋率 0.6%,横向钢筋采用直径 12 mm 螺纹钢,配筋率为 0.1%,钢筋设置在板中位置,采用嵌入区域约束类型(Embedded Region)将钢筋网嵌入到 CRC 板中[13]。

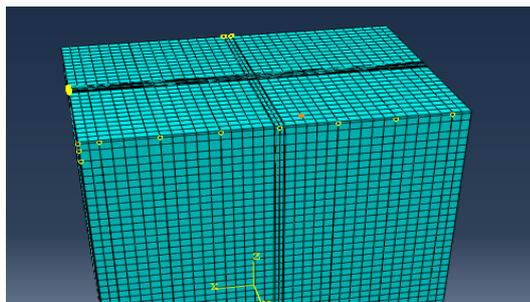


Figure 1. CRC + AC composite pavement finite element model
图 1. CRC + AC 复合式路面有限元模型

Table 1. Model calculation parameters

表 1. 模型计算参数

结构层	厚度(m)	不同温度下的 弹性模量(MPa)			泊松比	阻尼比	温缩系数($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)			密度 (kg/m^3)
		-10 $^{\circ}\text{C}$	0 $^{\circ}\text{C}$	10 $^{\circ}\text{C}$			-10 $^{\circ}\text{C}$	0 $^{\circ}\text{C}$	10 $^{\circ}\text{C}$	
沥青混凝土层(AC)	0.08	4200	1400	1230	0.35	0.9	1.1	1.5	1.7	2400
连续配筋混凝土层(CRC)	0.24		29,000		0.167	0.8		1.0		2300
钢筋	--		200,000		0.28	0.8		1.0		7800
水泥稳定碎石基层	0.40		1000		0.25	0.8		1.0		2300
土基	--		50		0.4	0.4		0.5		1800

为排除模型边界约束条件对应力分布的影响,在模型计算过程中采用八节点实体单元进行建模,该单元能够较好的模拟各结构层的力学性能。边界条件为行车方向前后两侧设置 YSYMM ($U_Y = U_{RX} = U_{RZ} = 0$),左右两侧设置 ZSYMM ($U_Z = U_{RX} = U_{RY} = 0$),模型底部由于土基底面的应力应变很小,模型底面可取为固定端约束,即设置 ENCASTRE ($U_X = U_Y = U_Z = U_{RX} = U_{RY} = U_{RZ} = 0$)。

2.2. 热力耦合模型的建立

沥青面层材料力学和热力学材料属性都随着温度的变化而发生变化,使用顺序热力耦合分析方法,先进行传热分析得到路面结构温度场结果,然后在应力分析时以预定场的方式添加温度场数据,得到 CRC + AC 复合式路面热力耦合下的应力响应。

根据某地实测一天 24 小时实测温度数据来定义一天的温度幅值曲线以模拟路面同大气环境的热交换过程,实测温度数据如表 2 所示。日太阳辐射总量 Q 为 9.14 MJ/m^2 、日平均风速 v 为 2.9 m/s 和日照时间 c 为 9.5 h 等外部气象参数。根据相关文献理论[14],利用有限元软件 ABAQUS 的子程序 FILM 定义随时间变化的外界温度实现“气温及对流热交换”过程,用子程序 DFLUX 定义随时间变化的热流实现“太阳辐射”过程,定义随时间变化的外界温度并进行稳态和瞬态热传导分析,模拟不同外界温度下连续变温条件下 CRC + AC 复合式路面结构的温度场。

Table 2. 24-hour temperature data for a region during the low-temperature season

表 2. 某地区低温季节 1 天 24 h 的实测代表性气温

时刻	气温(°C)	时刻	气温(°C)	时刻	气温(°C)	时刻	气温(°C)
0.5	-2.06	6.5	-7.58	12.5	2.93	18.5	2.83
1	-2.56	7	-6.59	13	2.87	19	3.19
1.5	-1.65	7.5	-8.64	13.5	3.22	19.5	2.62
2	-2.05	8	-6.87	14	4.40	20	2.41
2.5	-2.99	8.5	-5.46	14.5	4.23	20.5	1.98
3	-5.39	9	-4.61	15	4.98	21	1.63
3.5	-3.84	9.5	-2.52	15.5	4.99	21.5	1.40
4	-4.65	10	-1.67	16	4.94	22	0.80
4.5	-6.82	10.5	-0.84	16.5	4.87	22.5	0.16
5	-6.37	11	2.28	17	4.55	23	-0.27
5.5	-5.21	11.5	2.90	17.5	3.63	23.5	-1.08
6	-6.84	12	2.56	18	2.99	24	-1.70

2.3. 车辆荷载及加载方式

我国现行的沥青路面设计规范中采用的是双圆垂直均布荷载,但在实际中,轮胎与地面接触的形状并不是圆形,而是接近于矩形,随着重载车辆的比重越来越大,将轮载的接地形状简化为矩形会更加符合实际。双轮的中心间距采用《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2017)中的规定值 31.98 cm ,取行车方向轮胎长度为 $d = 21.3 \text{ cm}$,宽度 $L = 16.7 \text{ cm}$,因此,轮胎与路面的接触面积简化为 $0.213 \text{ m} \times 0.167 \text{ m}$ 的矩形,接地面积为 0.0356 m^2 轮胎与路面的接触模型如图 2 所示。

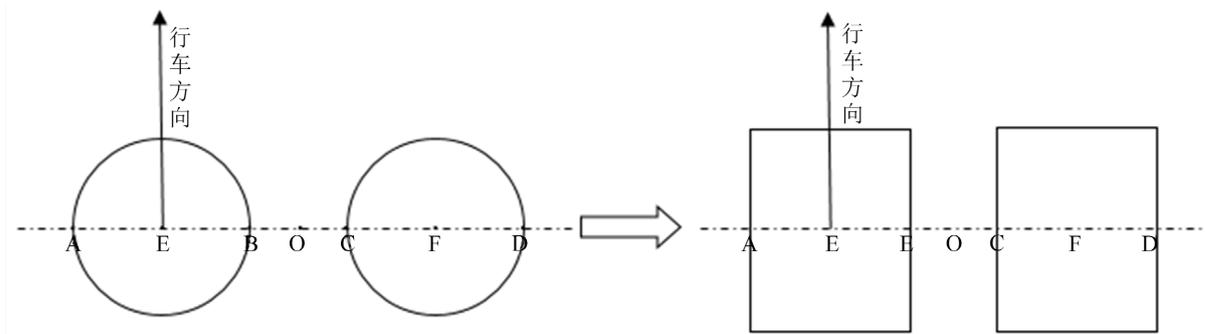


Figure 2. Simplified tire contact model
图 2. 轮胎接地简化模型

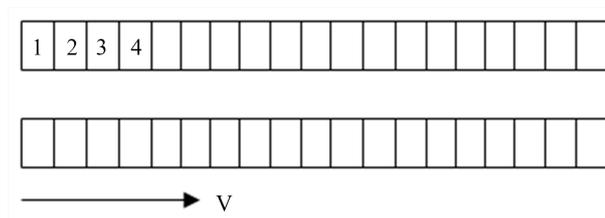


Figure 3. Simplified model of moving load belt
图 3. 移动荷载带简化模型

荷载移动带宽度与图 3 所示保持一致，沿行车方向细分成长度为 0.071 m 的小矩形，加载时三个小矩形为一个加载长度。车辆荷载沿移动带逐渐向前移动，每个分析步荷载整体向前移动 1 个小矩形面积，通过设置多个荷载步，实现车辆荷载的移动，如初始荷载加载在 1、2、3 小矩形，第二个分析步加载在 2、3、4 小矩形，以此类推。每个分析步的时间大小由车辆的行驶速度决定。当汽车匀速行驶时，荷载经过每个小矩形所用时间相同且大小为：

$$T = \frac{0.071}{v}$$

式中：v 为车辆行驶速度，m/s。

行车荷载采用标准双轮轴载 100 kN，车轮对地面的压力为 0.7 MPa，取车速为 60 km/h，行车荷载施加位置如图 4 所示。

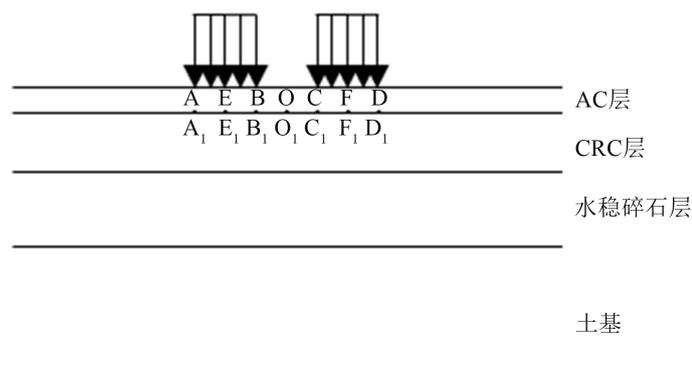


Figure 4. Wheel load application position map
图 4. 车轮荷载施加位置图

3. 温度和车载耦合下动力响应分析

研究 CRC + AC 复合式路面在温度和荷载耦合作用下力学响应时, 主要对正应力(σ_x 和 σ_y)和剪应力(τ_{zx} 和 τ_{zy}) 进行分析, 在预定义场中设置所载入的温度场数据, 并通过设置开始分析步和增量步以及结束分析步和增量步来截取冬季低温时段($t = 6 \text{ h}$)的温度场, 作为路面结构动力响应分析的典型温度场。取沿行车方向模型长度中点位置分析动力响应, 正应力计算位点选取位置为轮载正下方, 即 E/F 点处; 剪应力计算位点为轮迹边缘 B 点。

3.1. 正应力分析

对 CRC + AC 复合式路面在温度和荷载作用下不同深度的正应力进行分析, 图 5 为横向拉应力 σ_x 随时间的变化, 图 6 为纵向拉应力 σ_y 随时间的变化。

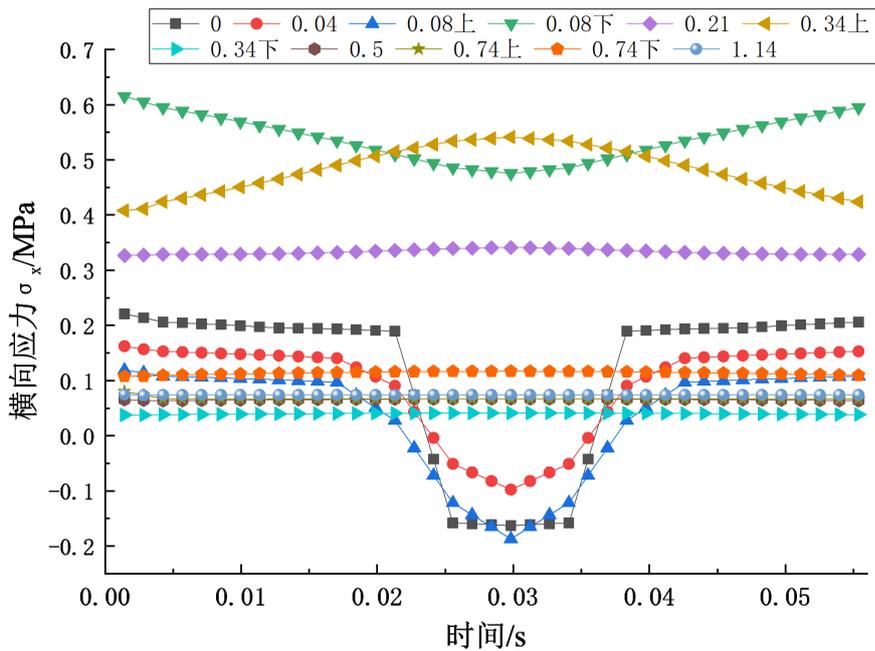


Figure 5. Variation Law of Transverse Stress σ_x of Pavement Structure Layers with Time
图 5. 路面结构各层横向应力 σ_x 随时间变化规律

由图 5 可以看出, CRC + AC 复合式路面在温度和荷载耦合作用下, 结构各层内既有压应力也有拉应力, AC 面层主要承受压应力, CRC 层主要承受拉应力, 随深度的增加压应力逐渐减小并转变为拉应力, 在行车荷载通过该 E/F 点左右时应力达到峰值, 其中最大压应力出现在 AC 层底部, 约为 0.19 MPa, 最大拉应力出现在 CRC 层底部, 约为 0.54 MPa。AC 层横向拉压应力的交变容易使路面出现疲劳损伤, 容易使 AC 层开裂。在车辆荷载行驶至计算位点的过程中, CRC 层顶的拉应力逐渐减小, 层底拉应力逐渐增大。由于 CRC 层硬度和刚度较大, 层内应力变化幅度较小, 水泥稳定碎石层及土基横向应力保持稳定。

如图 6 所示 CRC + AC 复合式路面各结构层的纵向应力与横向应力相同, 既有拉应力也有压应力, AC 面层主要承受纵向压应力, CRC 层主要承受纵向拉应力, 随深度的增加压应力逐渐减小并转变为拉应力, 在行车荷载通过 E/F 点左右时应力达到峰值, 其中 AC 层底压应力最大, 约为 0.21 MPa, 最大拉应力仍出现在 CRC 层底部, 约为 0.61 MPa。

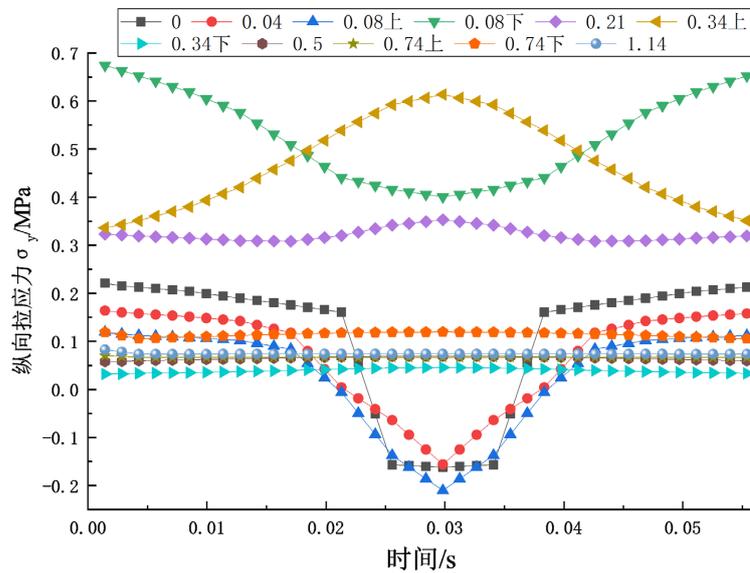


Figure 6. Longitudinal stress σ_y of each layer of pavement structure changes with time

图 6. 路面结构各层纵向应力 σ_y 随时间变化规律

3.2. 剪应力分析

对 CRC + AC 复合式路面在温度和荷载作用下不同深度的剪应力进行分析，图 7 为剪应力 τ_{zx} 随时间的变化，图 8 为剪应力 τ_{zy} 随时间的变化。

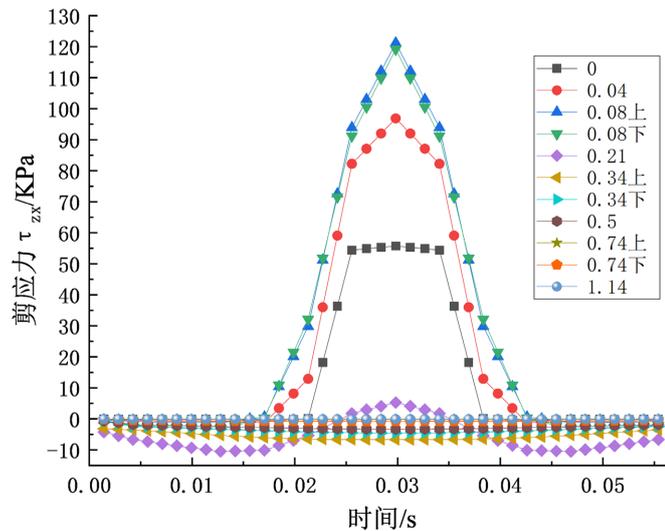


Figure 7. Shear stress τ_{zx} changes with time

图 7. 剪应力 τ_{zx} 随时间变化规律

由图 7 可知，CRC + AC 复合式路面各结构层在温度和行车荷载耦合作用下，AC 层受到剪应力 τ_{zx} 作用，在 AC 层内剪应力随深度而增加，最大剪应力出现在 AC 层底，为 121.2 kPa。CRC 内，剪应力顶部较大，为 119.1 kPa，随深度而骤降，在层底时几乎为 0 kPa。AC 层整体受到的 τ_{zx} 较大，当沥青层底层有横向开裂时，容易造成裂缝的进一步扩展。

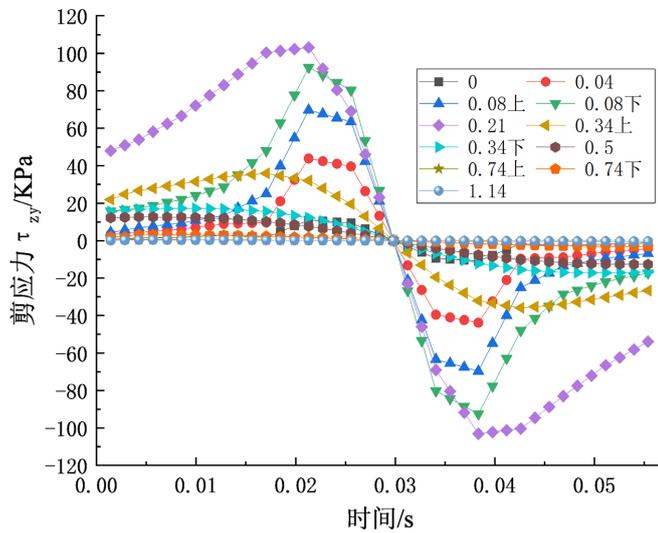


Figure 8. Shear stress τ_{zy} changes with time
图 8. 剪应力 τ_{zy} 随时间变化规律

如图 8 所示，CRC + AC 复合式路面各结构层的剪应力 τ_{zy} ，在温度和行车荷载耦合作用下各层都经历了方向相反的两次剪应力 τ_{zy} 的作用。整个结构层内，在行车荷载通过计算位点 B 之前，剪应力 τ_{zy} 为正值，通过后，剪应力 τ_{zy} 为负值。在 AC 层内，同一时刻， τ_{zy} 随深度增加不断增大，层底最大，为 69.7 kPa，层顶最小。在 CRC 层内， τ_{zy} 在层中最大，为 103.1 kPa，层顶次之，层底最小。剪应力呈现正负交替变化，易产生剪切疲劳破坏，在沥青层表层产生纵向开裂时，更容易促进裂缝扩展。

4. 影响因素分析

4.1. 轴重对路面结构的影响

为研究轴重对路面结构的影响，保持其他参数不变，对路面模型施加不同的接地压力分析其响应分析。取接地压力分别为 0.7 MPa、0.83 MPa、0.95 MPa 和 1.03 MPa 进行计算。

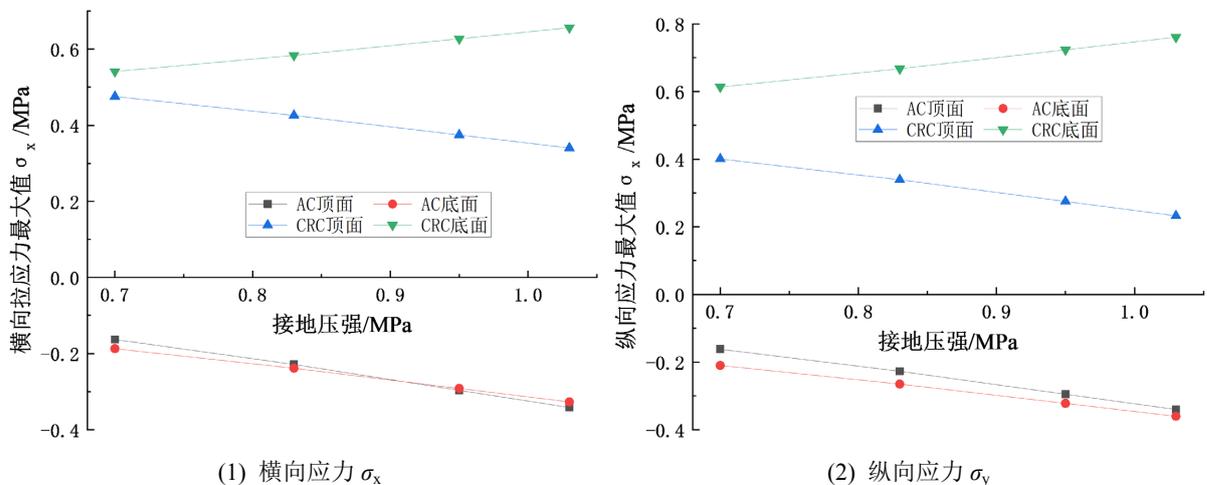


Figure 9. The effect of load on stress
图 9. 荷载对应力的影响

由图9可以看出,路面结构层正应力随着荷载压强变化呈明显的线性关系,AC层在车辆经过的过程中横向和纵向均受压;CRC层横向和纵向承受拉应力,且随着轴重增加,CRC顶面受到的横向和纵向拉应力逐渐降低,底面拉应力逐渐升高,荷载压强每增加0.1 MPa,CRC层顶部最大 σ_x 平均降低8.6%,底部最大 σ_x 平均增加6.4%。

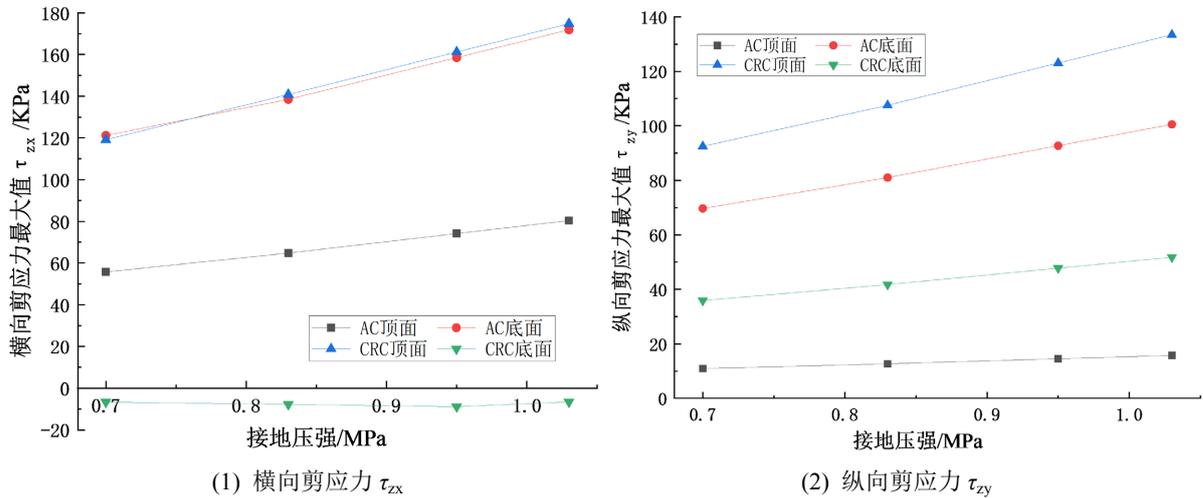


Figure 10. Shear stress changes with load

图 10. 剪应力随荷载变化规律

荷载压强变化时路面的剪应力变化规律如图10所示。荷载压强每增加0.1 MPa,AC层顶部最大 τ_{zx} 平均增加13.4%,底部最大 τ_{zx} 平均增加12.6%;AC层顶部最大 τ_{zy} 从10.9 kPa增加到15.8 kPa,底部最大 τ_{zy} 从69.7 kPa增加到100.5 kPa,荷载压强每增加0.1 MPa,AC层顶部和底部最大 τ_{zy} 均增加13.4%。

CRC层顶部最大 τ_{zx} 随荷载增加而增加,荷载压强每增加0.1 MPa, τ_{zx} 平均增加14.1%;底部 τ_{zx} 基本稳定;CRC层顶部最大 τ_{zy} 从92.5 kPa增加到133.4 kPa,底部最大 τ_{zy} 从35.9 kPa增加到51.8 kPa,荷载压强每增加0.1 MPa,CRC层顶部和底部最大 τ_{zy} 均增加13.4%。

从上述分析结果可以看出,沥青层主要受压应力,随着轴载增加AC层底受到的横向剪应力逐渐增加,而CRC层顶面受到较大的拉应力和剪应力,且随着轴重增加CRC层顶面受到的剪应力增加,拉剪反复作用下很容易导致CRC层收缩产生的微裂缝进一步发展,进而造成AC层反射裂缝。因此应该严格控制车辆超载。

4.2. AC层厚度对路面结构的影响

CRC+AC复合式路面,CRC板主要起着承重作用,AC层起着功能层的作用,AC层的厚度影响着路面经济性、舒适性。为研究AC层厚度对路面结构的影响,保持其他参数不变,保持CRC+AC复合式路面各结构层材料参数不变,分别取沥青层厚度为6 cm、8 cm、10 cm和12 cm,建立起不同AC层厚度下的CRC+AC复合式路面结构模型,分析AC层厚对CRC+AC复合式路面在温度和行车荷载耦合作用下的动力响应影响规律。

由图11可以看出,CRC+AC复合式路面结构层的横向和纵向应力随着AC层厚度变化呈线性关系,AC层在车轮经过时主要承受压应力。在AC厚度从6 cm增加到12 cm的过程中,AC层主要承受压应力;AC层底面压应力随AC厚度的增加逐渐减小, σ_x 减小了59.8%, σ_y 减小了60.5%。在AC厚度从6 cm增

加到 12 cm 的过程中, CRC 层表面横向拉应力 σ_x 增加了 24.2%, 纵向拉应力 σ_y 增加了 42.5%; CRC 层底面应力随 AC 厚度的增加逐渐减小, 但幅度不大, σ_x 减小了 4.7%, σ_y 减小了 6.2%。

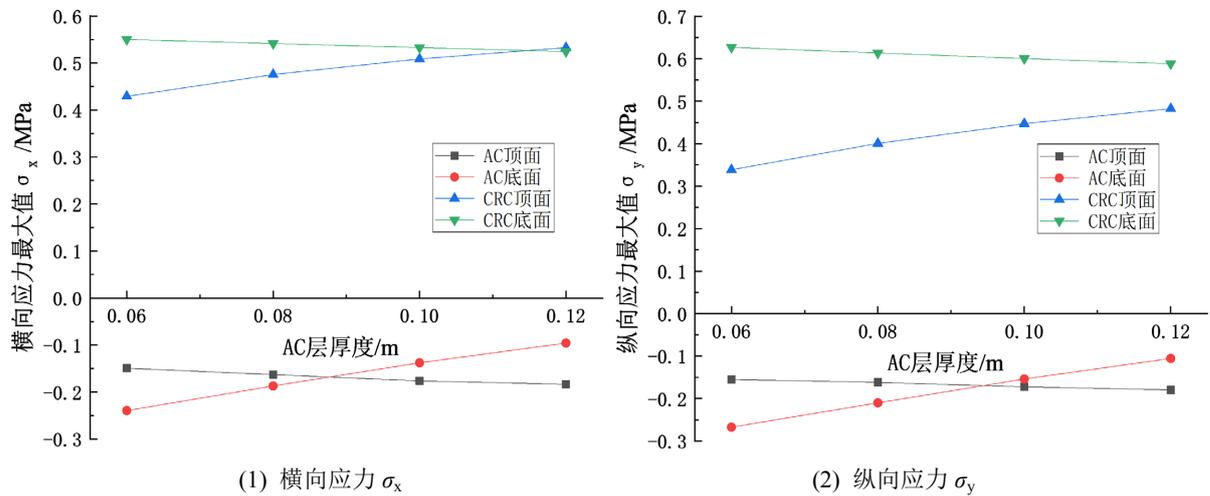


Figure 11. The stress changes with the thickness of the AC layer
图 11. 应力随 AC 层厚度变化规律

由图 12 计算可得, AC 层厚度每增加 2 cm, 横向剪应力 τ_{zx} 增加 22.2%, 纵向剪应力 τ_{zy} 增加 31.2%, AC 厚度对 AC 层顶面剪应力影响较大; 横向剪应力 τ_{zx} 降低 8.2%, 纵向剪应力 τ_{zy} 增加 4.2%, AC 厚度对 AC 层底面剪应力影响较小。AC 层厚度每增加 2 cm, 横向剪应力 τ_{zx} 降低 10.6%, 纵向剪应力 τ_{zy} 增加 0.9%, AC 厚度对 CRC 层顶面剪应力有一定影响; CRC 层底面 τ_{zx} 、 τ_{zy} 变化幅度在 2.3%~3.8%, AC 厚度对 CRC 层底面剪应力影响较小。

由上述结果分析可以看出, 随着沥青层厚度增加, AC 层底面横向和纵向压应力逐渐减小, 有转变为拉应力的趋势, AC 层顶面横向剪应力逐渐增大, 底面横向剪应力则减小, CRC 层拉应力变化不大, 层顶剪应力减小。AC 层厚度较小时沥青层底易产生横向剪切疲劳开裂, AC 厚度过大时容易产生横向 Top-Down 疲劳开裂。沥青层合理厚度仍需进一步讨论。

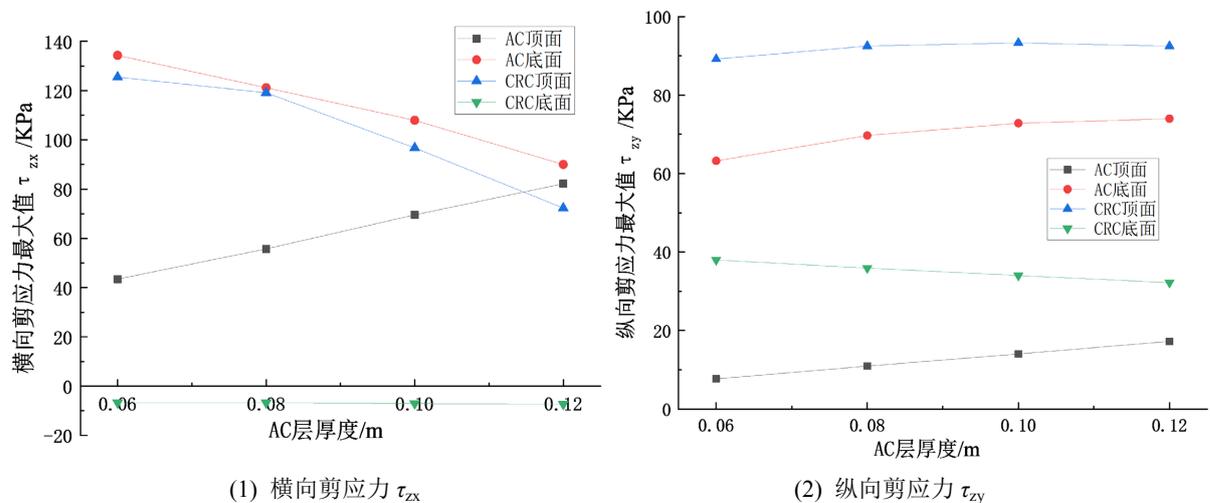


Figure 12. Shear stress varies with the thickness of AC layer
图 12. 剪应力随 AC 层厚度变化规律

4.3. 不同温度场对路面结构的影响

外界气温是影响 CRC + AC 复合式路面结构力学响应的重要因素，低温开裂和高温车辙是受温度影响较大的破坏类型。以基准气温升高 5℃、基准气温、降温 5℃和降温 10℃时得到的 T₁、T₂、T₃、T₄ 温度场为基础，分析不同温度条件下 CRC + AC 复合式路面温度和车辆荷载耦合作用下的路面动力响应。

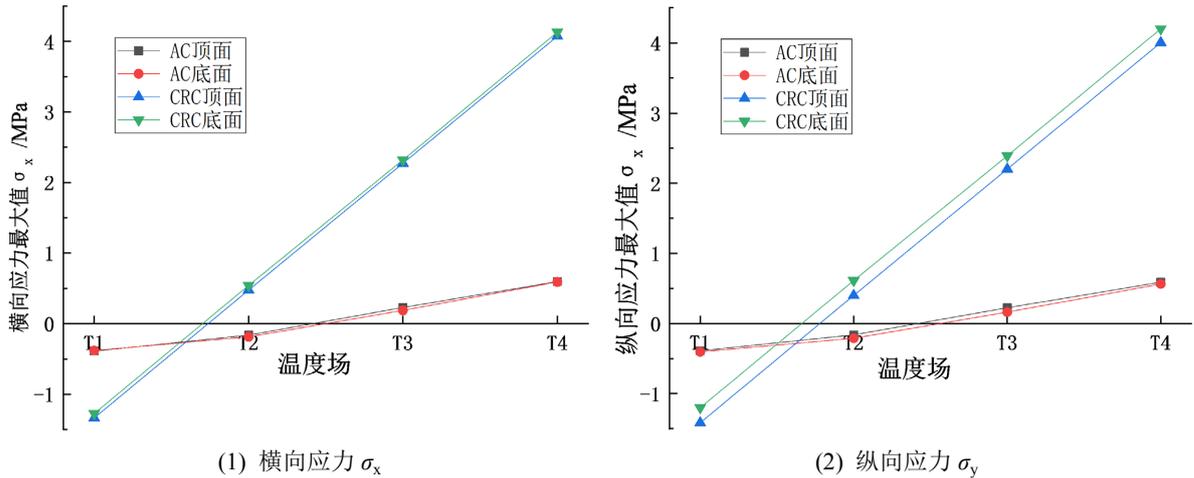


Figure 13. The effect of cooling on stress
图 13. 降温对应力的影响

由图 13 可以看出，AC 层和 CRC 层的横向应力 σ_x 和纵向应力 σ_y 初始为压应力，随着温度的降低，压应力不断变小，逐渐变为拉应力，且拉应力逐渐增大，每降低 5℃，AC 层顶面和底面 σ_x 、 σ_y 均增加 60% 以上，CRC 层顶面和底面 σ_x 、 σ_y 均增加一倍以上，降温对 AC 层和 CRC 层的力学响应影响较大。

从图 14 中可以看出，降温对路面结构层的剪应力影响很小，对于横向剪应力 τ_{zx} ，每降低 5℃，AC 层和 CRC 层的影响都在 1%。对于纵向剪应力 τ_{zy} ，每降低 5℃，AC 层顶面 τ_{zy} 增加 5.5% 左右，AC 层底面 τ_{zy} 增加 3.7% 左右，CRC 层顶面 τ_{zy} 增加 1.9% 左右，CRC 层底面 τ_{zy} 降低 1.3% 左右。

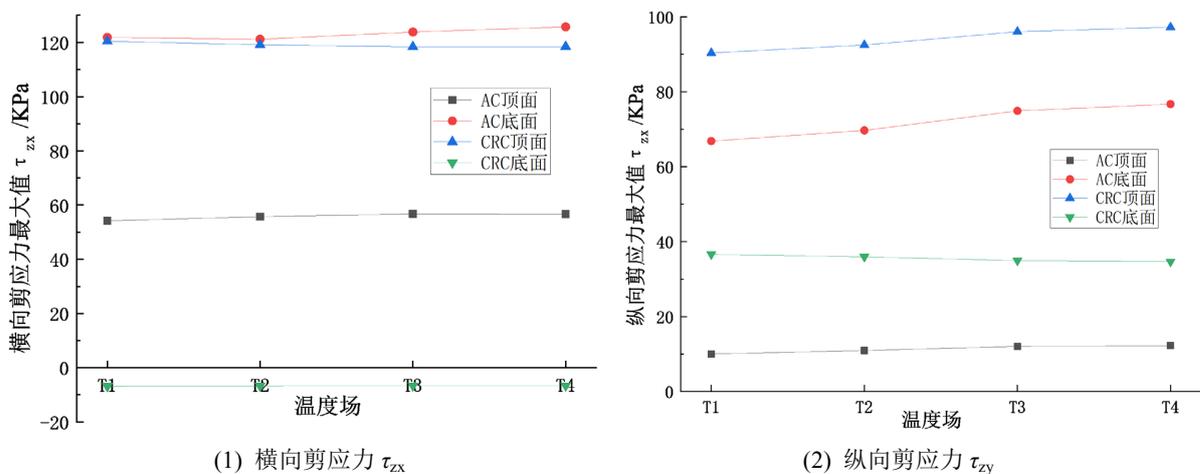


Figure 14. The effect of cooling on shear stress
图 14. 降温对剪应力的影响

从上述分析结果可以看出，降温主要对横向和纵向应力影响较大，降温越大横、纵向拉应力越大，

对剪应力影响较小,且降温对CRC层横向和纵向应力的影响更大,CRC层容易产生温度开裂,进而形成反射裂缝。

5. 结论

1) 仅受到温度作用时AC层受到一定的拉应力,在车辆荷载和温度共同作用下沥青层受到压应力和剪应力,拉应力和剪应力反复作用下很容易产生疲劳开裂。

2) 在车辆荷载作用下,CRC层顶面受到较大的拉应力和剪应力,且随着轴重增加CRC层顶面受到的剪应力增加,拉剪反复作用下CRC层收缩产生的微裂缝容易进一步扩展,从而造成AC层反射裂缝。

3) 随着沥青层厚度增加,AC层底面横向和纵向压应力逐渐减小,有转变为拉应力的趋势,AC层顶面横向剪应力逐渐增大,底面横向剪应力则减小,CRC层拉应力变化不大,层顶剪应力减小.AC层厚度较小时沥青层底易产生横向剪切疲劳开裂,AC厚度过大时容易产生横向Top-Down疲劳开裂。

4) 随温度的降低,AC层与CRC层的横向应力与纵向应力不断增加,增幅在60%以上,降温对路面结构层的剪应力影响很小。降温对CRC层横向和纵向应力的影响更大,容易导致CRC层产生温缩裂缝,从而导致路面产生反射裂缝。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51878076);湖南省自然科学基金(2022JJ30598)。

参考文献

- [1] 刘朝晖. 连续配筋混凝土复合式沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [2] de Barros, F.C.P. and Luco, J.E. (1992) Moving Green's Functions for a Layered Viscoelastic Half-Space. University of California, San Diego, CA, USA.
- [3] 邓学钧, 黄晓明, 沈伟新. 弹性层状体系的动态响应分析[J]. 土木工程学报, 1995(3): 9-16.
- [4] Olsson, M. (1987) Pavement Response under Dynamic Load Using Finite Element Method. *Journal of Transportation Engineering*, **6**, 236-246.
- [5] Van Metzinger, W.A. and McCullough, B.F. (1991) Performance of Bonded Concrete Overlays on Continuously Reinforced Concrete Pavement. *Concrete International*, **13**, 35-42.
- [6] Zaghoul, S. (1993) Deflection Response of Plate on Winkler Foundation to Moving Accelerated Loads. *Engineering Structure*, **121**, 321-341.
- [7] Vetter, C.P. (1933) Stresses in Reinforced Concrete Due to Volume Changes. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **98**, 1039-1053. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004490>
- [8] 李江, 王晓涛, 余胜军. 不同车速下沥青路面结构的动力响应[J]. 公路交通科技, 2015, 32(8): 6-11.
- [9] 董泽蛟, 谭忆秋, 欧进萍. 三向非均布移动荷载作用下沥青路面动力响应分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 122-130.
- [10] 乔建刚, 王伟, 程璨, 田亚磊. 基于温度-荷载耦合场的沥青路面抗裂分析[J]. 公路, 2019, 64(8): 38-43.
- [11] 马连湘, 郭剑峰, 何燕, 李海涛, 孟祥文, 陈振超. 基于的三维滚动轮胎的热力耦合分析[J]. 特种橡胶制品, 2008, 29(4): 27-29.
- [12] 田荣燕, 黄晓明, 殷大泉, 郑彬双. 基于水-热-力耦合作用的冻土区CRCP路面应力特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 286-293.
- [13] 王骁帆, 应正兵, 刘朝晖, 苏颖奇, 李盛. 温度场对连续配筋混凝土路面纵向配筋的影响[J]. 公路交通科技, 2017, 34(4): 16-24+57.
- [14] 李盛, 张豪, 程小亮. 非均布三向应力作用下CRC+AC复合式路面动力响应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 971-982.