

CRC+AC 复合式路面冬季温度场与温度应力研究

邓凤祥¹, 许路凯², 李盛³, 孙煜³

(1. 湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015; 2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450015;

3. 长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究 CRC+AC 复合式路面的温度场及温度应力,根据传热学的基本原理,运用 Fortran 语言编制子程序,扩展大型有限元软件 Abaqus 的功能,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,以某地冬季一天 24 h 实测气温数据模拟连续变温条件下连续配筋混凝土复合式路面结构的温度场,分析和研究结构层参数对连续配筋混凝土复合式路面结构冬季温度场与温度应力的影响规律。结果表明:冬季日周期内连续配筋混凝土层顶面的温度应力差值最高达 2.42 MPa,沥青层顶面的温度应力差值最高达 0.56 MPa;沥青层厚度越大,各结构层温度应力越小,连续配筋混凝土层厚度越大连续配筋混凝土层温度应力越小;沥青层和连续配筋混凝土层模量越大温度应力越大;随着气温的降低,最大应力与最小应力的差值随温度增加,但增加幅度不断变小,路面很容易产生温度疲劳破坏,导致路面出现裂缝。

关键词:CRC+AC 复合式路面; 温度场; 温度应力; 有限元法; 数值模拟

中图分类号: U416.224

文献标志码: A

CRC+AC(Continuously Reinforced Concrete+Asphalt Concrete)复合式路面是在 CRC 上加铺 AC 的一种复合式路面结构。CRC 板在纵向配置连续钢筋,中间不设横向接缝,提高了路面板的整体性,具有较高的承重能力和较好的耐久性^[1]。AC 面层可以改善 CRCP 的工作环境,提高行车舒适性,并且具有维修方便的优点。影响路面温度状况的外部因素包括温度、太阳辐射、风速、降雨量等气象因素,其中气温是关键因素,其次为太阳辐射。内部因素包括路面的热传导、热容量、对辐射热的吸收能力以及路面结构组合、厚度等。

几十年来,国内外道路研究人员在路面温度场的理论研究和试验研究方面做了大量的工作。Barber^[2]首先建立了路面表面温度和路面表面以下 3.5 英寸(1 英寸=2.54 cm)处的温度与气温和太阳辐射之间的关系;Zollinger^[3]利用非线性有限元的半离散结构,对 CRCP 早期横向裂缝和混凝土干缩做了研究,提出了缝隙宽度的计算方法;韩文杨等^[4]对 CRC+AC 复合式路面的温度场和温度梯度进行了实测,分析了温度场影响因素的滞后性与累积规律;顾兴宇等^[5]运用传热学原理,利用 Abaqus 有限元程序,对 CRC+AC 复合式路面的瞬态温度场进行了有限元分析;严作人等^[6]从定性与定量的角度分析了基层材料的热力学性质对路面结构温度场的影响规律;张磊等^[7]运用有限

元分析软件模拟分析并结合路面实测数据,对复合式路面的温度、温度梯度和变温速率沿深度方向的规律进行了研究,得到路面材料的热吸收率是影响路面温度场的主要因素;Hills 等^[8]在温度应力的计算中假设路面为一无限长的受约束条带,采用准弹性梁的力学模型提出了著名的路面应力近似计算公式;Zollinger、Kohler^[3,9]研究发现早期横向裂缝主要由温缩和干缩应力引起,并受到温度梯度和车辆循环荷载引起温度翘曲应力和荷载应力的影响;王骁帆等^[11]通过有限元分析了温度场,研究发现温度场和温度梯度均随时间变化表现出周期性;郭超等^[12]基于随机有限元法,对水泥路面在温度应力与随机车辆荷载耦合作用下进行了最大 Mises 应力的统计回归分析,确定水泥路面应力的概率分布模型与可靠度指标。

该文在既有研究的基础上,针对 CRC+AC 复合式路面结构在冬季路面易开裂季节的温度场和温度应力进行分析,以揭示 CRC+AC 复合式路面结构在冬季受温度影响产生开裂的原因。

1 路面温度场模型建立及验证

1.1 路面结构有限元模型建立

(1) 模型尺寸参数

收稿日期:2021-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878076)

作者简介:邓凤祥,女,大学本科,高级工程师,E-mail:71181411@qq.com

模型沿行车方向取 7.5 m、垂直行车方向取 7.5 m(双车道)、深度方向取 10 m。结合现行 JTG D40—2011《公路水泥混凝土路面设计规范》以及国内外研究成果和实体工程调查数据,选取连续配筋混凝土板横向裂缝间距为 1.5 m,裂缝宽度为 0.5 mm。

各结构层计算参数如表 1 所示。CRC 板纵向钢筋采用 16 mm 螺纹钢筋,配筋率 0.6%,横向钢筋采用 12 mm 螺纹钢筋,配筋率为 0.1%,钢筋模量 $E=2.0\times10^5$ MPa,密度 7 800 kg/m³,钢筋设置在板中位置,采用裂缝虚拟填料的方法模拟传荷作用。

表 1 模型计算参数

结构层	厚度/ m	弹性模量/ MPa	泊松比	阻尼比	密度/ (kg·m ⁻³)
沥青混凝土层(AC)	0.08	1 200	0.3	0.9	2 400
连续配筋混凝土层(CRC)	0.24	29 000	0.167	0.8	2 300
水泥稳定碎石基层	0.40	1 000	0.25	0.8	2 300
土基	—	50	0.40	0.4	1 800

(2) CRC 层模型

CRC 层选用分离式有限元模型,利用 Abaqus 软件 Interaction(相互作用)功能模块定义混凝土与钢筋各部分自由度之间的约束关系,使用嵌入区域约束(Embedded Region)类型将模型的钢筋区域镶嵌到混凝土区域中。

(3) 单元类型与网格划分

路面结构采用 C3D8R 三维线性八节点减缩积分实体单元,CRC 层中钢筋采用 T3D2 三维二节点线性桁架单元,采用嵌入区域约束类型将钢筋网嵌入到

CRC 板中。网格划分时,综合考虑计算结果的准确性和计算资源的有效利用,在所研究的路面区域内将网格划分加密为 0.09 m×0.09 m,其他区域网格为 0.46 m×0.46 m。

1.2 温度场模型建立及验证

(1) 温度场模型建立

计算时按前文模型尺寸参数取值,混凝土采用 C3D8R 三维线性八节点减缩积分实体单元,温度场计算参数如表 2 所示。

表 2 温度场计算参数

结构层	热传导率 k / [J·(m·h·°C) ⁻¹]	密度 / (kg·m ⁻³)	热容量 / [J·(kg·°C) ⁻¹]	太阳辐射吸 路面发射 收率 α_s 率 ϵ	绝对零度 值/°C	Stefan-Boltzmann 常数 [J·(h·m ² ·K ⁴) ⁻¹]
AC	4 670	2 300	924	0.9	0.80	-273
CRC	6 200	2 400	780			
水稳碎石	5 620	2 200	911			
土基	5 620	1 800	1 040			

通过定义一天的温度幅值曲线来实现路面同大气环境的热交换过程,某地冬季一天 24 h 共 48 个时间点的温度数据如表 3 所示。日太阳辐射总量 Q 、日平均风速 v 和日照时间 c 等外部气象参数如表 4 所示。

利用有限元软件 Abaqus,使用子程序 FILM 定义随时间变化的外界温度,即实现“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,即实现“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,模拟连续变温条件下 CRC+AC 复合式路面结构的温度场。

(2) 温度场模型验证

选用“足尺路面试验环道”STR5 段刚性基层沥青路面结构中温度传感器采集的数据进行 CRC+AC 复合式路面温度场验证,其结构为 4 cm 厚 SBS—AC13 上面层,6 cm 厚 A30—AC20 中面层,2 cm 厚 SBS—AC10 下面层,基层分 3 层,最上层为 24 cm 厚 CC,中间层为 20 cm 厚 CBG—A,最下层为 20 cm 厚 CS。计算结果与足尺环道沥青混凝土路面 STR5 段实测的温度资料进行比较,结果如表 5 所示。

表3 某地区低温季节一天24 h的实测代表性气温

时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃	时刻	气温/℃
00:30	29.19	06:30	27.61	12:30	33.12	18:30	34.05
01:00	29.13	07:00	28.62	13:00	34.00	19:00	33.39
01:30	29.24	07:30	29.21	13:30	33.74	19:30	33.11
02:00	28.88	08:00	29.95	14:00	34.58	20:00	32.70
02:30	28.46	08:30	30.26	14:30	35.28	20:30	32.30
03:00	28.24	09:00	30.17	15:00	35.16	21:00	31.68
03:30	27.57	09:30	31.77	15:30	34.99	21:30	31.38
04:00	27.28	10:00	30.96	16:00	35.04	22:00	31.43
04:30	27.38	10:30	31.98	16:30	35.83	22:30	31.01
05:00	27.37	11:00	31.80	17:00	35.30	23:00	30.69
05:30	27.09	11:30	32.43	17:30	35.18	23:30	30.08
06:00	27.11	12:00	33.28	18:00	34.51	24:00	29.49

表4 外部气象参数

月份	太阳辐射总量 Q/(MJ·m ⁻²)	日照时间 c/h	日平均风速 v/(m·s ⁻¹)
低温季节某月	9.14	9.5	2.9

表5 温度的计算值与实测值比较

时刻	温度/℃		时刻	温度/℃	
	实测值	计算值		实测值	计算值
01:00	36.8	35.9	13:00	37.7	38.3
02:00	36.8	35.4	14:00	38.9	39.5
03:00	35.6	34.9	15:00	40.2	40.4
04:00	35.0	34.4	16:00	41.1	41.3
05:00	34.6	34.0	17:00	41.7	41.9
06:00	34.2	33.7	18:00	41.9	41.9
07:00	33.8	33.4	19:00	41.6	41.6
08:00	33.6	33.3	20:00	40.9	40.1
09:00	33.7	33.6	21:00	40.0	40.1
10:00	34.3	34.4	22:00	39.1	39.3
11:00	35.3	35.5	23:00	38.3	38.6
12:00	36.5	36.9	24:00	37.6	38.0

由表5可知:计算值与实测值的差别很小,最大误差为3.7%,用该模型预测路面内部温度变化可行。

2 冬季温度场及温度应力分析

2.1 冬季温度场分析

(1) 路面结构温度分析

使用表3中温度数据施加4个温度周期后,路面结构层的温度变化基本稳定。图1为06:00路面结构温度场和14:00路面结构温度场。图2为不同深度24 h温度变化。

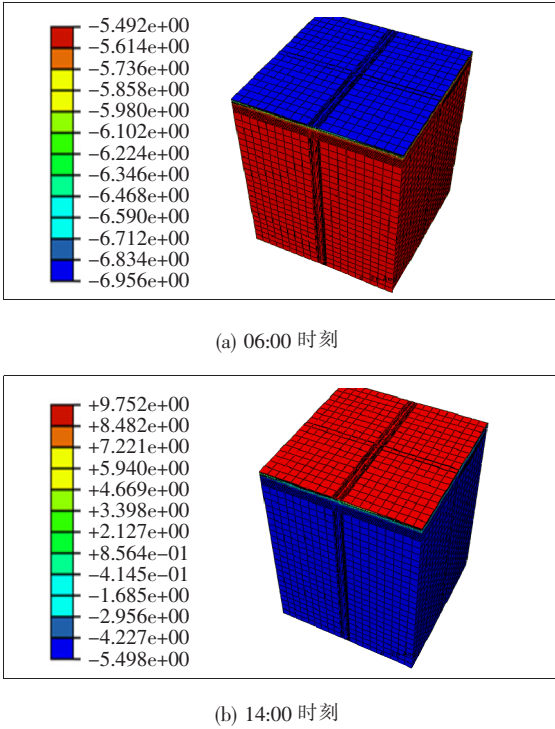


图1 路面结构温度场(单位:℃)

从图1、2可以得到:冬季沥青路面内部温度场,温度呈现先降低,太阳出现后再升高、然后降低的趋势,随气温的变化同步变化;沥青路面不同深度温度随着深度的不断增加,变化幅度越来越小,沥青面层受外界

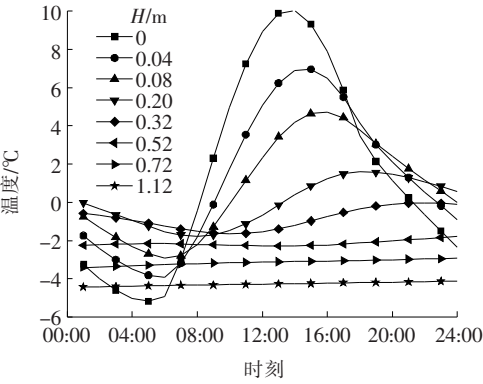


图 2 冬季路面不同深度 24 h 温度变化

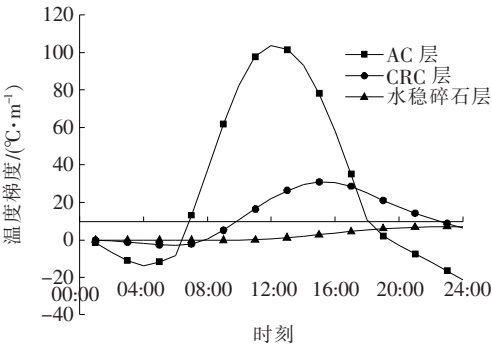


图 3 冬季路面各结构层温度梯度

气温影响最大,且幅度最大。深度超过 0.8 m 时温度变化幅度基本平稳,路面结构层温度均在 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

(2) 路面结构温度梯度分析

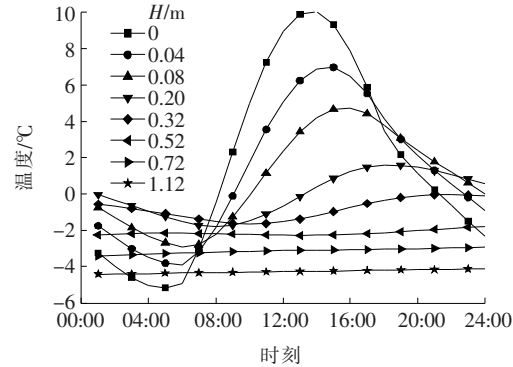
通过冬季温度场计算路面各结构层温度梯度随时间的变化规律,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出:冬季低温条件下路面各结构层温度梯度随时间变化规律一致,随外界气温的升高而升高,随气温下降而下降。随路面深度的增加,温度梯度的变化越来越小,且最大温度梯度出现的时刻有所延后。冬季低温季节 AC 层最大温度梯度为 $103.74\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,出现在 12:00 左右;CRC 层最大温度梯度为 $30.90\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,出现在 15:00 左右。

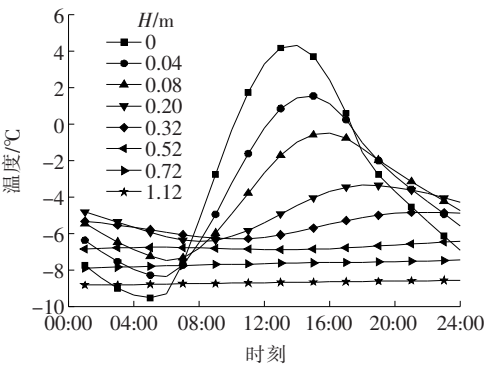
(3) 降温对温度场的影响

以冬季温度为基础,分别计算 CRC+AC 复合式路面在降温幅度为 5、10、15 $^{\circ}\text{C}$ 下的温度场,结果如图 4 所示。

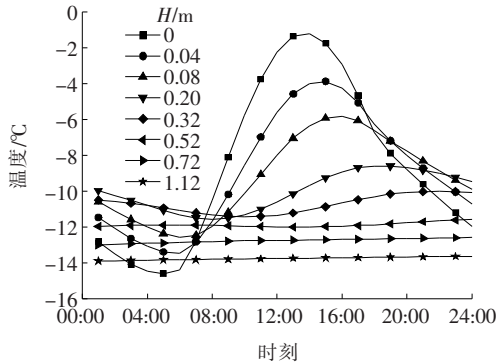
由图 4 可知:沥青路面内部温度场升降规律与气温升降规律一致,外界环境变化对表面层的温度变化影响最大。温度在沥青路面表面首先达到最大值,再依次传递至其他层,热量传导需要一定的时间,随着深



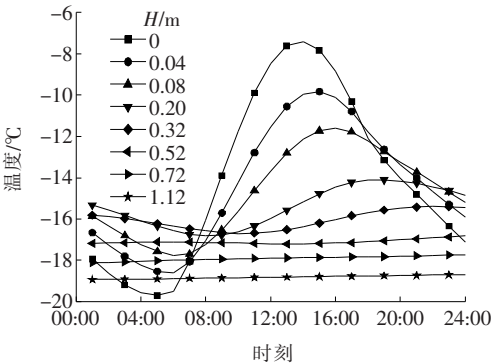
(a) 冬季初始温度下



(b) 降温 5 $^{\circ}\text{C}$ 时



(c) 降温 10 $^{\circ}\text{C}$ 时



(d) 降温 15 $^{\circ}\text{C}$ 时

图 4 不同降温幅度下 CRC+AC 复合式路面的温度场

度的增加,各层达到温度最大值的时间有所延后。温度下降过程中,各结构层温度变化具有同样规律。

2.2 冬季温度应力分析

(1) 材料参数及接触类型

使用模拟得到的路面结构各层在不同时刻的温度场来计算路面结构的温度应力,路面结构各层材料在不同温度时的劲度模量和泊松比以及路面结构各层材料随温度变化的劲度模量和线膨胀系数如表 6 所示,假定材料的泊松比不随温度变化而变化。定义沥青层与连续混凝土板以及各层间接触关系为完全连续。

表 6 CRC+AC 复合式路面结构各层力学参数

材料	温度/ ℃	杨氏模 量/MPa	泊松比	线膨胀系数/ (10 ⁻⁵ ℃ ⁻¹)
沥青 混合料	-10	4 200	0.35	1.1
	0	1 400		1.5
	10	1 230		1.7
	20	870		2.0
	30	620		2.2
	40	554		2.3
	50	530		2.6
	60	526		2.7
连续配筋混凝土		29 000	0.17	1.0
水稳碎石层		2 000	0.25	1.0
土基		60	0.35	0.5

(2) 冬季温度应力分析

研究路面结构不同深度及层间应力分布和变化规律,根据模拟得到的温度场,分析沥青层表面和底面、连续配筋混凝土层顶面和底面以及水泥稳定碎石层顶面和底面的应力变化规律。得到图 5 不同深度 24 h 温度应力变化。

从图 5 可以看出:CRC+AC 复合式路面结构各层温度应力的变化同温度变化一致,路面结构由于温度升高膨胀而产生压应力,因温度降低收缩而产生拉应力,呈现周期性变化。温度应力在连续配筋混凝土层顶面变化幅度最大,各结构层内温度应力随深度增加而逐渐减弱,到达 0.6 m 深度时应力几乎不发生改变;由于结构层材料的性质不同,导致连续配筋混凝土层温度应力比沥青层大,且在结构层连接处应力出现较大变化;对于 AC 层表面,在 0:00—09:00、21:00—24:00 间,温度应力为正,在 09:00—21:00,温度应力为负;AC 层底面,在 0:00—11:00 间,温度应力为正,

在 11:00—24:00,温度应力为负;CRC 层顶面,在 0:00—11:00,温度应力为正,在 11:00—24:00,温度应力为负;冬季连续配筋混凝土层拉应力最大为 0.94 MPa,压应力最大为 1.48 MPa,沥青层温度应力较连续配筋混凝土层小,拉应力最大为 0.26 MPa,压应力最大为 0.30 MPa,均出现在结构层顶部;日周期内连续配筋混凝土层顶面的温度应力差值最高达 2.42 MPa 左右,沥青层顶面的温度应力差值最高达 0.56 MPa 左右,由于热胀冷缩的反复作用,路面很容易产生疲劳性破坏。

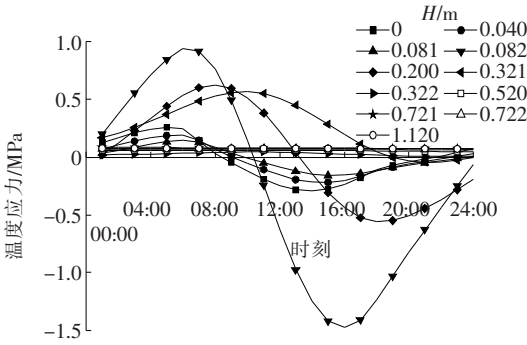


图 5 冬季不同深度 24 h 温度应力变化

(3) 降温对温度应力的影响

温度对沥青混合料的模量影响较大,在冬季温度降低,沥青混合料的劲度增大,导致受到的拉应力也增大,当沥青混合料的抗拉强度低于沥青混合料所受的拉应力时,裂缝随之产生。另外在连续配筋混凝土层,温度降低,使其形成了较大的温度梯度,导致较大的温度应力。为研究降温对应力变化的影响,分别计算降温前、降温 5℃、10℃和 15℃时 AC 层与 CRC 层上下表面的应力,结果如图 6、7 所示。

由图 6、7 可知:降温对 AC 层与 CRC 层温度应力影响很大,随着气温的降低,最大应力与最小应力的差值随温度增加,但增加幅度不断变小,路面很容易产生温度疲劳破坏,导致裂缝出现。

各层位拉应力呈线性增加,气温每降低 5℃,AC 层顶面最大拉压应力增加 0.38 MPa,AC 层底面最大拉压应力增加 0.36 MPa,CRC 层顶面最大拉压应力增加 1.75 MPa,CRC 层底面最大拉压应力增加 1.65 MPa。

3 温度应力影响因素分析

3.1 AC 层厚度对温度应力的影响

AC 层的厚度会对 AC 层和 CRC 层的温度场及温

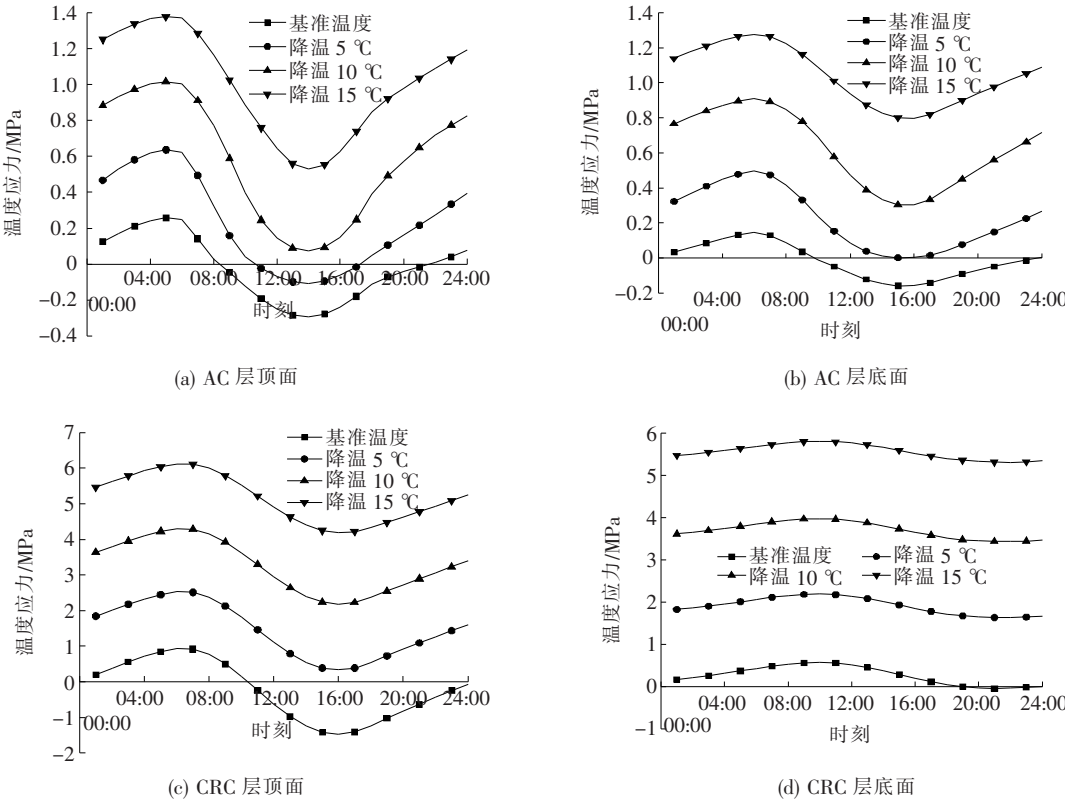


图 6 降温对温度应力的影响

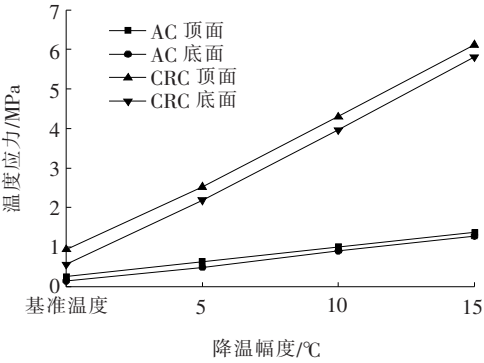


图 7 降温对最大拉应力的影响

度应力产生影响,为此保持模型其他参数不变,CRC层厚取 24 cm,AC 层厚分别取 6、8、10、12、14 cm 进行计算,得到不同 AC 层厚度时路面结构温度场及温度应力如图 8、9 所示。

由图 8、9 可以看出:在降温阶段,铺装层结构各位置温度应力不断上升,在升温阶段,铺装层的温度应力逐渐减小并出现负值。随着 AC 层厚度的增加,AC 层温度应力随 AC 层厚度增加而线性递减,每增加 2 cm 平均递减 2%,降低幅度不大;CRC 层温度应力随 AC 层厚度增加而线性递减,CRC 层的最大拉应力与

最大压应力有明显的降低,AC 层厚度每增加 2 cm 最大拉应力平均递减 12%,最大压应力平均递减 18.5%;AC 层和 CRC 层的最大温度应力差逐渐减小,但随厚度的增加,减大幅度逐渐降低。

不同 AC 层厚度下路面结构在一个周期 24 h 内各位置最大拉应力及最大压应力值及出现时间如表 7 所示。

由表 7 可以得出:① 随着结构层深度的增加,最大应力出现的时刻与温度相似,均有所延迟。对于 AC 层顶面,其最大拉应力都出现在 05:00,此时 AC 层顶面温度最低,最大拉应力为 0.26 MPa 左右,AC 层顶面最大压应力出现在 14:00,其值为 0.30 MPa 左右,且没有随 AC 层厚度的增加产生明显改变。AC 层底面最大拉应力出现在 06:00,最大压应力出现在 15:00,随 AC 层厚度增加最大应力出现的时刻均有所延迟,最大拉应力为 0.17 MPa,最大压应力为 0.19 MPa 左右,最大应力随 AC 层厚度的增加而降低;② CRC 层顶面最大拉应力出现在 06:00,最大压应力出现在 15:00,随 AC 层厚度的增加最大应力出现的时刻均有所延迟,最大拉应力为 1.08 MPa,最大压应力为 1.77 MPa 左右,最大应力随 AC 层厚度的增加有

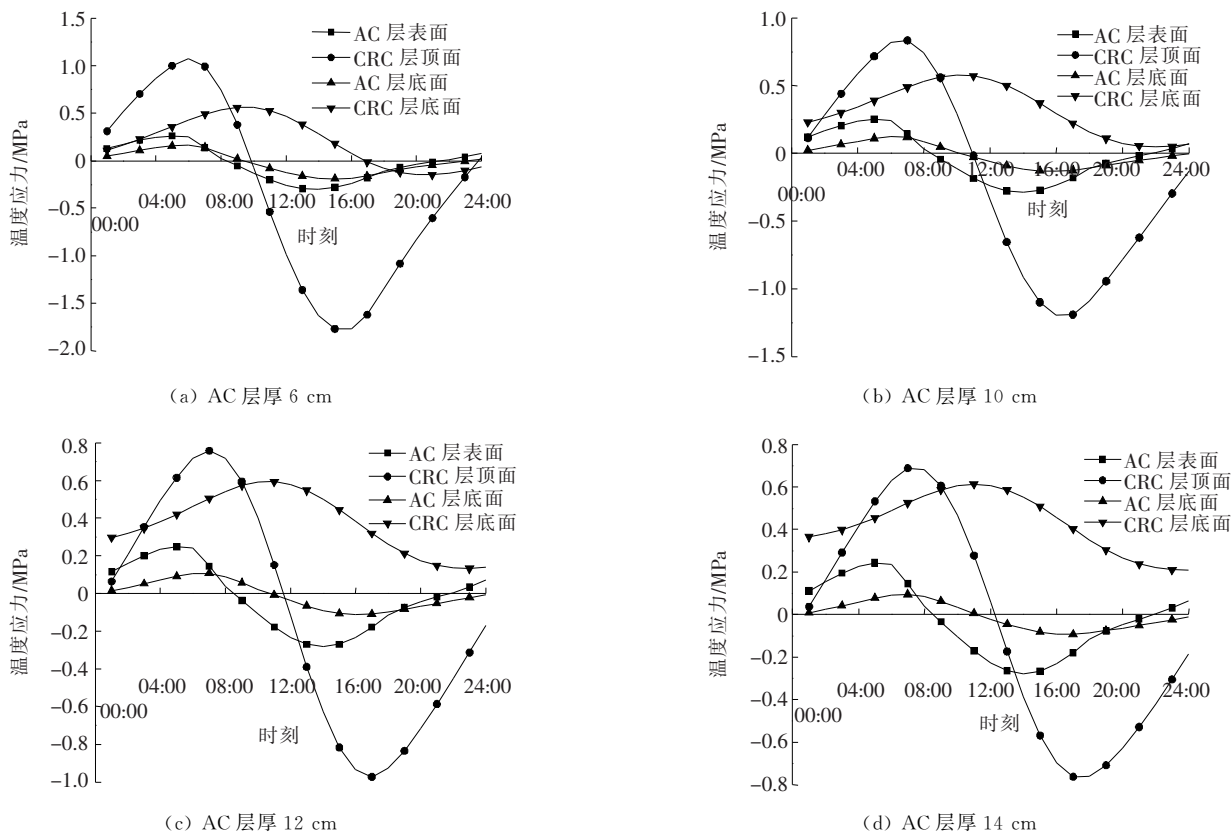


图8 不同AC层厚度对温度应力的影响(AC层厚度取8 cm时图略)

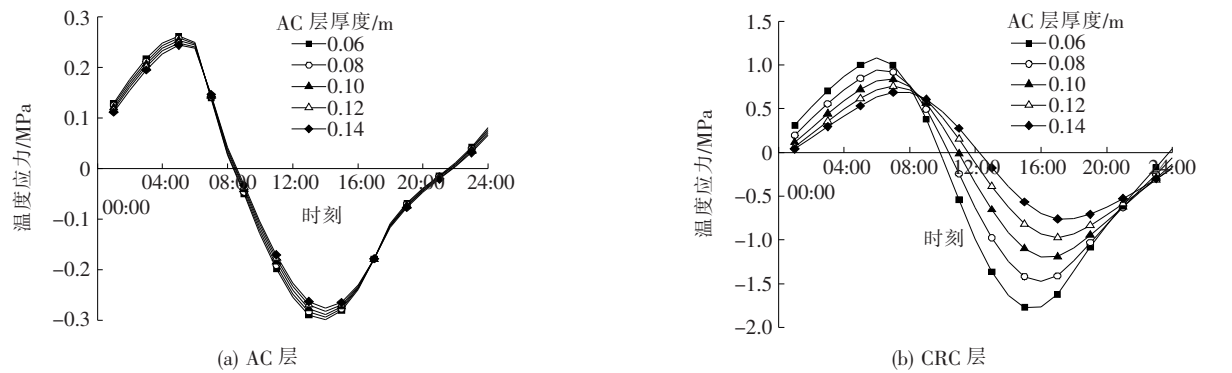


图9 不同AC层厚度下的路面结构最大温度应力

表7 不同AC层厚度下各层位最大温度应力及出现时刻

AC层 厚度/ m	AC层顶面				AC层底面				CRC层顶面				CRC层底面			
	最大 拉应 力/MPa	出现 时刻	最大 压应 力/MPa	出现 时刻	最大 拉应 力/MPa	出现 时刻	最大 压应 力/MPa	出现 时刻	最大 拉应 力/MPa	出现 时刻	最大 压应 力/MPa	出现 时刻	最大 拉应 力/MPa	出现 时刻	最大 压应 力/MPa	出现 时刻
0.06	0.26	05:00	0.30	14:00	0.17	06:00	0.19	15:00	1.08	06:00	1.77	15:00	0.56	09:00	0.15	21:00
0.08	0.26	05:00	0.29	14:00	0.15	06:00	0.16	15:00	0.94	06:00	1.47	16:00	0.57	10:00	0.04	21:00
0.10	0.25	05:00	0.29	14:00	0.12	06:00	0.13	16:00	0.84	07:00	1.20	16:00	0.58	10:00	—	—
0.12	0.25	05:00	0.28	14:00	0.11	07:00	0.11	16:00	0.76	07:00	0.97	17:00	0.59	11:00	—	—
0.14	0.24	05:00	0.28	14:00	0.10	07:00	0.09	17:00	0.69	07:00	0.76	17:00	0.61	11:00	—	—

明显的降低。CRC 层底面最大拉应力出现在 09:00, 随 AC 层厚度增加最大应力出现的时刻均有所延迟, 最大拉应力为 0.61 MPa, 最大拉应力随 AC 层厚度的增加而增加。

以上分析表明:在所研究的温度条件下,AC 层和 CRC 层的温度应力与 AC 层厚度有关,随着 AC 层厚度的增加,AC 层最大拉应力与最大压应力有所降低,但是降低幅度不大;CRC 层的最大拉应力与最大压应力有明显的降低。

3.2 AC 层模量对温度应力的影响

沥青混合料的弹性模量与温度密切相关,为探究沥青层模量对温度应力的影响,路面各结构层材料相关参数保持不变,只改变沥青混凝土层在不同温度下的弹性模量,即在表 6 中模量数值的基础上,分别增加 200、400、600 MPa,得到结果如图 10、11 所示。

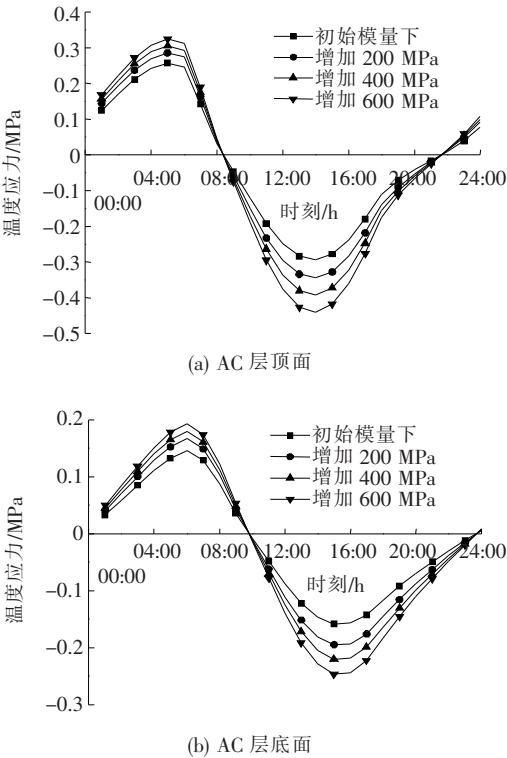


图 10 沥青层模量对沥青层温度应力的影响

图 10、11 表明:在相同温度场作用下,AC 层的温度应力都随着沥青面层材料弹性模量的增加而线性增大,每增加 200 MPa,AC 层顶面最大拉应力分别增加 11%、7%、5%,最大压应力分别增加 17%、14%、2%,AC 层底面最大拉应力分别增加 14%、8%、7%,最大压应力分别增加 21%、14%、11%,增大幅度随模量增大而减小。温度反复升降会引起沥青材料模量的反复

变化,进而引起温度疲劳裂缝。CRC 层温度应力几乎不受 AC 层模量的影响。

3.3 CRC 厚度对温度应力的影响

CRC 层的厚度会对 CRC 层的温度应力产生影响,为此保持模型其他参数不变,AC 层厚取 8 cm, CRC 层厚分别取 18、20、22、24、26 cm 进行计算,得到不同 CRC 层厚度时路面结构的温度应力。结果如图 12、13 所示。

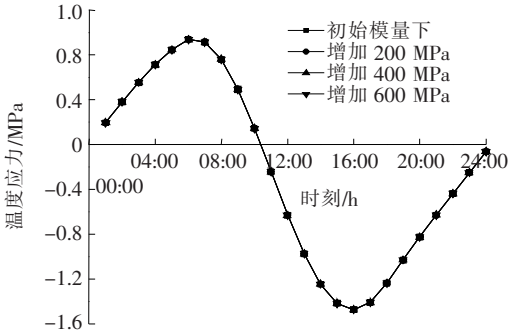


图 11 CRC 层最大温度应力随 AC 层模量变化

由图 12、13 可知: CRC 层的厚度对 AC 层的温度应力没有影响,对 CRC 层顶部的影响几乎可以忽略,但是在 CRC 层中,随着深度的增加 CRC 层温度应力随板厚的增加而降低,最大拉应力降低 2.4%,最大压应力降低 10%。

3.4 CRC 层模量对温度应力的影响

CRC 层的模量对 CRC 层温度应力的影响不可忽略,路面各结构层材料相关参数保持不变,只改变 CRC 层的弹性模量,分别取 2.8×10^4 、 2.9×10^4 、 3.0×10^4 、 3.1×10^4 MPa,模拟计算得到 CRC 层顶部在 1 d 内的最大拉应力与最大压应力,结果如图 14 所示。

图 14 表明:在相同温度场作用下,CRC 层的温度应力都随着 CRC 层模量的增加而线性增大,每增加 1 000 MPa,CRC 层顶面最大拉应力增加 4%左右,最大压应力增加 3.5%左右。

4 结 论

以传热学理论为基础,使用 Abaqus 有限元软件,分析了冬季低温 1 d 气温变换作用下的路面结构温度场变化以及冬季 1 d 路面各结构层温度应力变化,并通过改变 AC 层和 CRC 层厚度与模量以及温度场,研究其对结构层温度应力的影响,主要结论如下:

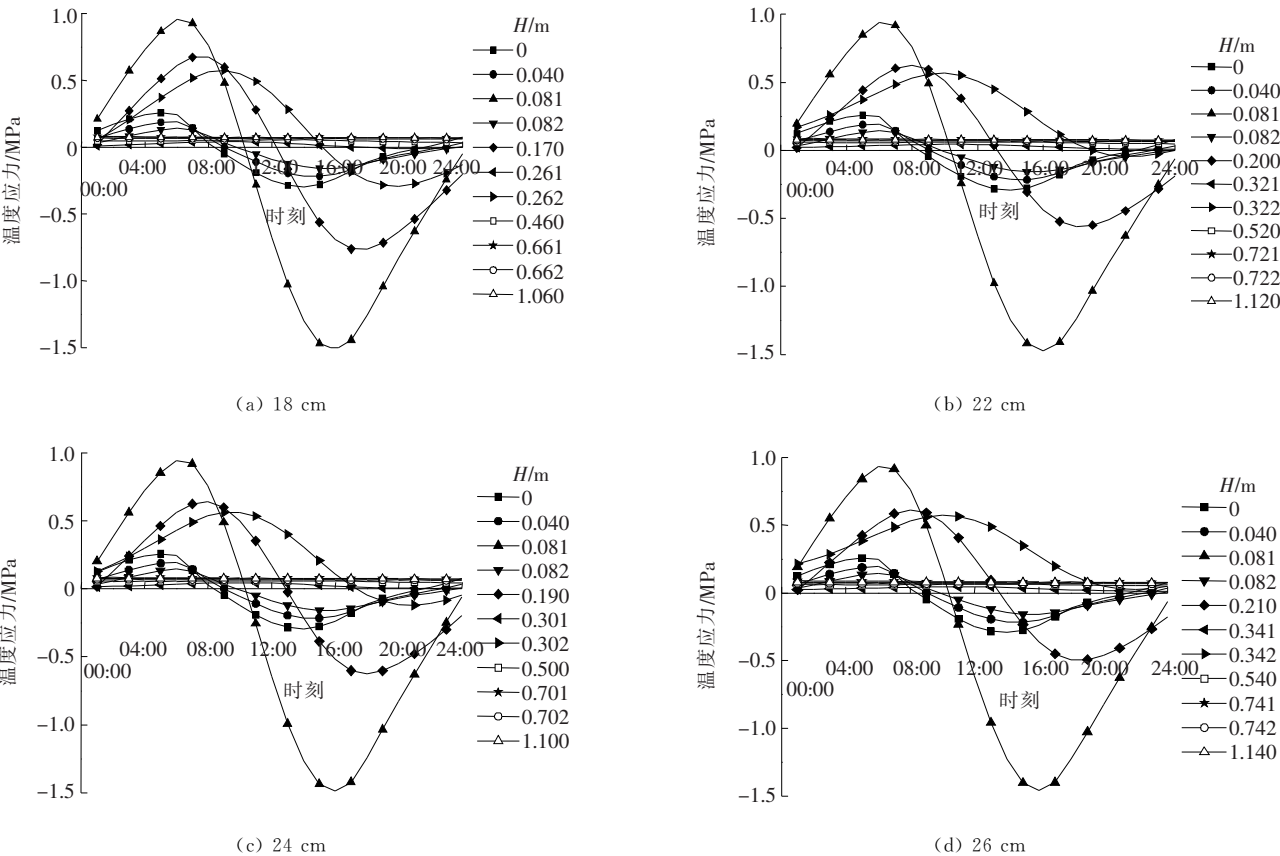


图 12 不同 CRC 层厚度下路面结构不同深度的温度应力(CRC 层厚度取 20 cm 时图略)

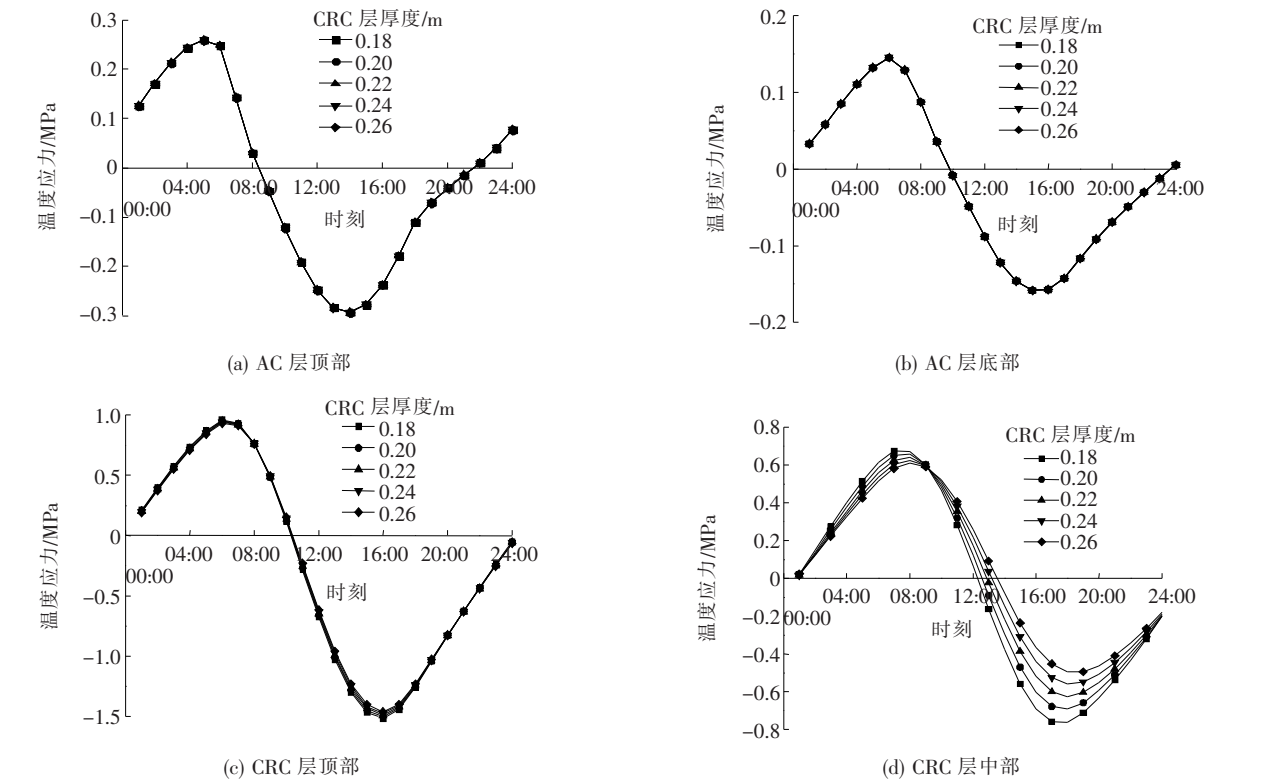


图 13 不同 CRC 层厚度下路面结构层的温度应力

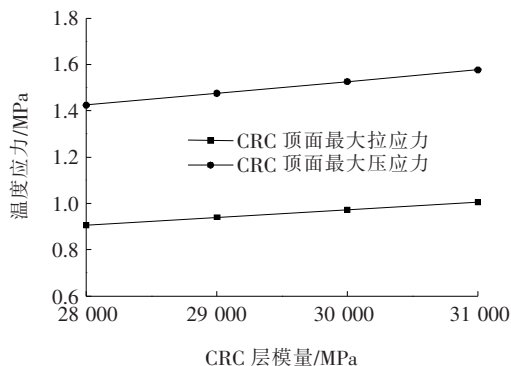


图 14 CRC 层模量对 CRC 层顶部温度应力的影响

(1) 降温对 AC 层与 CRC 层温度应力影响很大, 气温每降低 5°C , AC 层顶面最大拉压应力增加 0.38 MPa, AC 层底面最大拉压应力增加 0.36 MPa, CRC 层顶面最大拉压应力增加 1.75 MPa, CRC 层底面最大拉压应力增加 1.65 MPa。随着气温的降低, 最大应力与最小应力的差值随温度增加, 但增加幅度不断变小, 路面很容易产生温度疲劳破坏, 导致路面容易出现裂缝。

(2) 日周期内连续配筋混凝土层顶面的温度应力差值最高达 2.42 MPa, 沥青层顶面的温度应力差值最高达 0.56 MPa, 由于热胀冷缩的反复作用, 路面很容易产生疲劳性的破坏。

(3) AC 层温度应力随 AC 层厚度增加而线性递减, 每增加 2 cm 平均递减 2%; CRC 温度应力随 AC 层厚度增加而线性递减, 每增加 2 cm 最大拉应力平均递减 12%, 最大压应力平均递减 18.5%。在 CRC 层中, 随着深度的增加 CRC 层温度应力随板厚的增加而降低, 最大拉应力降低 2.4%, 最大压应力降低 10%。

(4) AC 层模量每增加 200 MPa, AC 层顶面最大拉应力最高增加 11%, 最大压应力最高增加 17%; AC 层底面最大拉应力最高增加 14%, 最大压应力最高增加 21%, 增大幅度随模量增大而减小。CRC 层的温度应力都随着 CRC 层模量的增加而线性增大, 每增加

1 000 MPa, CRC 层顶面最大拉应力增加 4% 左右, 最大压应力增加 3.5% 左右。温度反复升降会引起沥青材料模量的反复变化, 进而引起温度疲劳裂缝。

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] BARBER E S. Calculation of Maximum Pavement Temperature from Weather Reports[J]. Highway Research Board Bulletin, 1957, 168: 1-8.
- [3] ZOLLINGER D G, BUCH N, XIN D, et al. Performance of Continuously Reinforced Concrete Pavements[R]. United States: Office of Research and Development, Federal Highway Administration, 1999.
- [4] 韩文扬, 韦金城, 王林. AC+CRCP 复合式路面温度场分析[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 98-102.
- [5] 顾兴宇, 袁青泉, 倪富健. 基于实测荷载和温度梯度的沥青路面车辙发展影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 30-36.
- [6] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报, 1984(3): 76-85.
- [7] 张磊, 黄卫, 王斌, 等. 考虑温度与荷载耦合作用的连续配筋混凝土复合式路面损伤分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 108-114.
- [8] HILL J F. Predicting the Fracture of Asphalt Mixes by Thermal Stresses[R]. London, England: Institute of Petroleum, 1974.
- [9] KOHLER E R, ROESLER J R. Crack Width Measurements in Continuously Reinforced Concrete Pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(9): 645-652.
- [10] 王骁帆, 应正兵, 刘朝晖. 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.
- [11] 郭超, 于红梅, 朱壁禾, 等. 基于随机有限元的水泥路面热力耦合可靠性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 864-872.