

荷载与温度耦合作用下“白加黑”复合式路面 沥青加铺层的受力分析

朱春福^{1,2}, 程培峰^{2*}, 赵广宇^{1,2}

(1. 东北农业大学 园艺园林学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 东北林业大学 土木工程学院)

摘要: 为研究正常使用状态下“白加黑”路面沥青加铺层结构的受力性能,利用 Ansys 有限元分析软件构建路面结构模型,根据不同车轮作用位置,分成不同工况考虑温度与车辆的耦合作用,分析降温前后最大应变变化情况及出现的位置,发现降温变化对沥青加铺层结构的不利影响,并探讨较易出现裂缝的位置及裂缝的形式。分析结果表明:温度变化尤其是降温过程会大幅增加加铺层底张拉应变,加速其裂缝的产生;张拉裂缝与剪切裂缝可能出现在距水泥路面接缝 1/2 车轮范围内的区域,其中接缝区域较易出现剪切型裂缝,剪切裂缝一般为上宽下窄,张拉裂缝为下宽上窄。进行“白加黑”路面沥青加铺层裂缝的防治,要重点防治接缝区域的剪切裂缝和距接缝 1/2 车轮范围内的张拉裂缝。

关键词: “白加黑”路面; 沥青加铺层; 耦合作用; 裂缝; 车轮位置

截至 2018 年底,中国公路通车总里程达 484.65 $\times 10^4$ km。其中,水泥混凝土路面由于具有力学强度高、承载能力强、耐久性好、经济性良好等优点,在中国的路面结构中占据重要地位。随着交通流量和轴载的增加,中国水泥混凝土路面的缺点逐渐凸显:平整度、舒适性差;基层抗冲刷不满足要求;路面维修困难等。为了改善路面的服务性能,工程人员研究出在水泥混凝土板上铺筑沥青面层的刚柔复合式路面。这种路面通过普通水泥混凝土或碾压混凝土板满足承载力需求,沥青面层的目的主要是提高路面的平整度、改善行车舒适性、降低噪声和改善雨天行车安全性。同时,水泥混凝土的强度和抗冲刷能力又比半刚性基层材料大很多,因此,刚柔复合式路面在中国道路建设中有着广阔的应用前景。

当前,在水泥混凝土路面的升级改造中,也常采用

在旧水泥混凝土路面上加铺沥青混凝土面层的方法。但使用过程中,由于两种结构层材料性能差异较大、旧水泥混凝土路面存在裂缝和接缝、温度产生的水平位移及荷载产生的竖向位移周期性反复作用,旧水泥混凝土面板产生的拉应力传递至沥青混凝土加铺层,当拉应力超过沥青混凝土加铺层抗拉强度时,沥青混凝土加铺层会在旧水泥混凝土面板接缝、裂缝处产生反射裂缝。

路面在服务期间,既受到外界温度变化的影响,也要承受车辆荷载的作用。为了探讨温度与车辆荷载耦合作用对“白加黑”路面加铺层的影响,该文借助通用有限元程序 Ansys 对加铺沥青面层的水泥混凝土路面建模,进行力学分析,结合路面钻芯取样,寻找反射裂缝产生和发展的规律,为延缓反射裂缝的出现和防治提供参考数据。

- *****
- [5] Masad E, Tashman L, Samedavan N, et al. Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 374-383.
- [6] 郭庆林,程永春,陶敬林. 沥青混凝土数字图像集料粘连

- 效应分割方法研究[J]. 公路交通科技, 2015(3).
- [7] 王春昱,胡海军,白志刚,等. 基于 CEL 算法的沥青路面动水压力数值模拟分析[J]. 交通节能与环保, 2018(3).
- [8] 程永春,郭庆林,谭国金,等. 沥青混合料图像矢量化建模的改进方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013(5).

收稿日期:2019-11-26(修改稿)

基金项目:黑龙江省交通运输厅重点科技项目(编号:HLJ2015-10)

作者简介:朱春福,男,博士研究生. E-mail:zcf_abc@163.com

* 通信作者:程培峰,男,博士,教授. E-mail:chengpeifeng@126.com

1 模型的构建

1.1 参数

旧混凝土板上加铺沥青层路面结构,选取水泥路面面板平面尺寸为 $5.5\text{ m}\times4.5\text{ m}$ (长 \times 宽),以两块板及其间接缝(假设为 1 cm)为计算范围。为便于理论分

析,采用如下假设:各结构均为均匀、连续、各向同性的连续弹性体;各层层间竖向、水平位移均连续;地基底面各向位移为 0 ,地基侧面水平方向位移为 0 ;接缝处无传递荷载能力。

为反映半无限空间地基的特性,地基采用扩大尺寸来模拟,路面结构各层材料的平面尺寸、厚度、材料的弹性模量、泊松比的取值如表1所示。

表1 有限元模型参数

结构层	平面尺寸(长 \times 宽)/ ($\text{m}\times\text{m}$)	厚度/ m	模量/ MPa	泊松比	线膨胀系数/ [$(^{\circ}\text{C})^{-1}$]	热导率/ [$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]
沥青加铺层	11.01×4.5	0.15	$1\,200$	0.25	2.1×10^{-5}	0.9
水泥路面	$5.5\times4.5+5.5\times4.5$	0.24	$30\,000$	0.15	1.0×10^{-5}	1.5
半刚性基层	12.01×5.5	0.25	$1\,500$	0.25	0.6×10^{-5}	1.2
土基	13.01×6.5	7.00	40	0.35	0.5×10^{-5}	1.0

道路结构模型取自哈阿公路。国道301线阿城(刘秀屯)—哈尔滨公路是黑龙江省第一条高等级公路,原设计里程 $\text{K}0+000\sim\text{K}29+925$ 为一级路白色路面,水泥混凝土面板厚 24 cm ,基层水稳砂砾厚 18 cm ,水泥石灰稳定土 16 cm ,运营多年后,采用加铺 15 cm 厚沥青混凝土面层对路面进行补强。有限元模型构建中,半刚性基层厚度按照水泥石灰稳定土 $+1/2$ 水稳砂砾进行折算,即按 25 cm 厚取用。

1.2 受力工况

该文采用单轴双轮组标准轴载 $\text{BZZ}-100$ 进行分析计算,轮胎作用于路面的形状简化为矩形。单轮荷载简化为 $15.7\text{ cm}\times22.8\text{ cm}$ 的矩形均布荷载,接触面积为 357.96 cm^2 ,平均接地压力标准轴载为 0.7 MPa ,双轮中心距为 0.32 m ,两侧双轮间距为 1.82 m (图1)。根据荷载的作用位置分成3种不同受力工况(图2),轮载前进边缘与接缝边缘对齐(工况A),轮载前进边缘与接缝中心线对齐(工况B),轮载中心线与中心线对齐(工况C)。

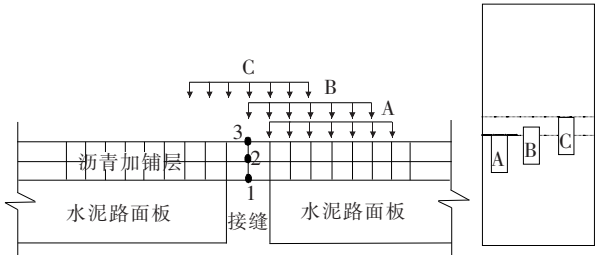


图2 不同工况轮载位置示意

义材料属性,同时选用Solid45和Solid185单元类型,网格划分时土基选用 $0.6\text{ m}\times0.6\text{ m}$ 大网格尺寸,半刚性基层选用 $0.1\text{ m}\times0.1\text{ m}$ 网格尺寸,考虑车轮荷载施加方便,水泥路面板及沥青加铺层均采用 $0.0785\text{ m}\times0.076\text{ m}$ 的网格尺寸,接缝附近网格细化为 $0.076\text{ m}\times0.005\text{ m}$ 。

分析中采用瞬态分析,假定车辆间距 100 m ,车辆行驶速度 60 km/h ,两辆车通过接缝区同一位置的时间间隔为 6 s ,将输入的车辆荷载转化为随时间变化的载荷,较静载更为接近实际情况。考虑软件运算时间成本,该算例选取交通量为 100 辆车。

2 数据分析

根据有限元软件计算,可得到不同工况在考虑温度作用前后接缝位置节点的应力、应变值。选择那些数值较大(对结构影响较大)的指标进行分析。

2.1 降温对加铺层受力的影响

在冬季气温骤变时,较大的温度梯度主要发生在沥青面层内。当遇到骤然升温及反复升降温等极端

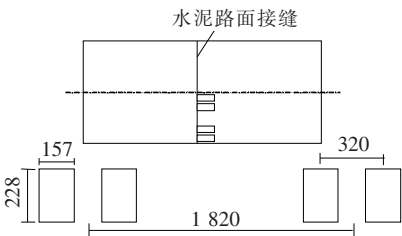


图1 车轮加载位置及作用尺寸示意(单位:mm)

1.3 网络划分及力学计算

进行Ansys有限元分析时,根据表中材料参数定

气温时,沥青面层更容易产生温缩裂缝及温度疲劳裂缝。依据哈尔滨工业大学于 2009 年 1 月至 2011 年上半年对路面温度测量数据,冬季,哈尔滨市平均气温基本低于 0℃,一年中最低温度出现在 1 月,路面日降温幅度为 10℃左右。据 2011 年温度荷载的确定方法,采用热分析,计算出各结构层降温前后的温度,而后将温度与车辆荷载同时施加于结构并进行计算。为便于分析,选取加铺层横向边缘对应于接缝中心的节点 1(底),2(中),3(顶)进行分析(图 2)。表 2 为日正常气温条件下距路表不同深度位置各测点的实测温度及在气温骤降条件下,依据实测的路表温度,借助 Ansys 软件热力分析后得到各结构层表面温度(通过输入表 2 中最上层结构温度进行试算,计算得到其他层温度与表 2 数据较接近,误差最大为 12%,说明热分析结果较为可靠)。表 3 为考虑温度作用前后,不同工况时

水泥路面接缝处加铺层在竖向不同位置(底、中、顶)节点力学分析结果。

表 3 结合表 2 可以找出温度作用前后受力变化较大的指标,并据此分析降温过程会对加铺层的受力产生如下影响:

表 2 距路表不同深度各测点实测温度

距路表 深度/ cm	2010-01-16(日正常气温)		气温骤降	
	日最低 温/℃	日最高 温/℃	日最低 温/℃	日最高 温/℃
2	-20.0	-10	-20.0	-10.0
5	-19.5	-11	-19.3	-11.0
10	-18.5	-13	-18.1	-12.0
20	-14.0	-12	-13.6	-11.5
30	-8.0	-8	-8.2	-8.1

表 3 考虑温度作用前后不同工况时接缝处加铺层不同位置节点力学分析结果

是否考虑 温度作用	位置	工况	$\sigma_x /$ MPa	$\sigma_z /$ MPa	$\tau /$ MPa	$\epsilon_x /$ $\mu\epsilon$	$\epsilon_y /$ $\mu\epsilon$	$\epsilon_z /$ $\mu\epsilon$	$\gamma /$ $\mu\epsilon$
不考虑	加铺层底(节点 1)	A	0.243	-0.193	-0.250	240	0.186	-214	-521
		B	0.281	-0.344	-0.252	264	-1	-414	-525
		C	0.523	-0.294	-	486	-3	-365	-
	加铺层中(节点 2)	A	-0.031	-0.192	-0.263	11	58	-157	-547
		B	-0.024	-0.518	-0.272	33	64	-426	-566
		C	-0.024	-0.469	-	76	109	-388	-
	加铺层顶(节点 3)	A	-0.305	-0.192	-0.275	-218	117	-100	-573
		B	-0.328	-0.694	-0.291	-198	130	-436	-606
		C	-0.570	-0.644	-	-333	221	-410	-
考虑	加铺层底	A	0.658	-0.152	-0.247	572	-72	-272	-514
		B	0.684	-0.262	-0.249	587	-71	-526	-518
		C	0.986	-0.238	-	853	-82	-422	-
	加铺层中	A	0.288	-0.152	-0.262	266	-6	-192	-546
		B	0.292	-0.436	-0.271	285	1	-494	-565
		C	0.316	-0.413	-	344	41	-415	-
	加铺层顶	A	-0.082	-0.152	-0.278	-40	61	-112	-579
		B	-0.101	-0.612	-0.294	-180	74	-462	-612
		C	-0.354	-0.588	-	-165	164	-408	-

注: x 向为行车方向, y 向为垂直于行车的方向, z 向为竖向。

(1) 接缝中心加铺层底的拉应力、应变显著增大
工况 A、B、C 下应力增幅分别为 171%、143%、89%,应变增幅分别为 138%、122%、76%。
这是因为气温骤降,相对于沥青混凝土材料,水泥

混凝土会产生较大的收缩变形,水泥混凝土路面在收缩过程中对沥青加铺层产生拉伸作用。
降温后,3 种工况下应力大小排序为 $C>B>A$,应力增幅排序为 $A>B>C$,应变亦是如此。由于裂缝的

产生,主要是外力作用在材料内部所产生的应变超过材料的极限应变所导致。由此可见,A工况时,降温对加铺层张拉裂缝的产生影响最大,B工况时影响次之,C工况时影响最小。

(2) 对应接缝中心位置的加铺层竖向压应变有不同幅度变化

A工况:加铺层顶、中、底增幅分别为12%、22%、27%;B工况:加铺层顶增幅分别为6%、16%、27%;C工况:加铺层顶降幅为0.5%,加铺层中、底增幅分别为7%、16%。

加铺层在接缝中心处竖向压应变增加,与气温骤降后,水泥混凝土路面收缩过程中受到加铺层的约束,从而使加铺层受拉,竖向变薄有关。降温后,3种工况下加铺层各层位(顶、中、底)竖向压应变大小排序为C>B>A,压应变增幅排序为A>B>C。

(3) 接缝中心加铺层底的横向应变显著增大
3种车轮位置下,加铺层底均由横向受拉转为横向受压。A、B、C工况下应变数值增幅分别为386、70、26倍,增幅大小排序为A>B>C。

这是由于加铺层纵向受拉有伸长趋势,其横向尺寸必然有所收缩,从而使各研究节点呈现横向受压。且压缩比例大小顺序也与纵向受拉时一致。

(4) 接缝中心加铺层中层的纵向应力、应变显著增大

降温后,3种工况下加铺层中层均由纵向受压转

为纵向受拉。

A、B、C工况下应力增幅分别为829%、1117%、1217%;应变增幅分别为2318%、264%、353%。

由此可见:降温对加铺层产生的受拉,在加铺层的中间层仍有很大的影响,数值方面远超过车轮荷载所产生的影响。

降温后,3种工况下加铺层中层纵向拉应力、应变大小排序为C>B>A,应力增幅排序为C>B>A,应变增幅排序为A>B>C。

2.2 降温对旧水泥路面板接缝宽度的影响

降温前后水泥路面板接缝顶端、底端节点纵向水平位移见表4。由表4可以发现:

(1) 不考虑温度作用,车辆通过水泥路面原有接缝时,接缝顶端空隙是缩小的,缩小幅度最大为0.042mm;接缝底端空隙是增加的,最大增幅为0.248mm。

(2) 考虑降温作用,车辆通过水泥路面原有接缝时,接缝顶端空隙由缩小转为增大,变化幅度为0.8mm左右,最小为0.808mm,最大为0.812mm;接缝底端空隙维持增加状态,变化幅度为0.8mm左右,最小为0.794mm,最大为0.822mm。

由于降温的作用,水泥路面板产生的收缩变形远大于车辆荷载引起的变形。由于沥青加铺层与水泥混凝土面层间有效接触,水泥混凝土路面在收缩过程中受到沥青混凝土加铺层的约束,从而将对沥青加铺层产生较大的张拉应力。

表4 降温前后各工况下水泥混凝土板顶、底面在接缝处的纵向水平位移

是否考虑温度	工况	板顶				板底			
		左29547/mm	右47010/mm	位移/mm	形式	左25312/mm	右42645/mm	位移/mm	形式
不考虑	A	0.014	-0.019	0.033	收缩	-0.137	0.089	0.226	张开
	B	0.015	-0.012	0.027	收缩	-0.135	0.113	0.248	张开
	C	0.021	-0.021	0.042	收缩	-0.112	0.112	0.224	张开
考虑	A	-0.406	0.372	0.778	张开	-0.561	0.482	1.043	张开
	B	-0.404	0.377	0.781	张开	-0.550	0.492	1.042	张开
	C	-0.385	0.385	0.770	张开	-0.523	0.523	1.046	张开

2.3 温度耦合作用下加铺层裂缝可能出现的位置及形式

加铺层在外力作用下,产生超过极限的应变,会在相应的位置开裂。为确定可能的开裂位置和开裂形式,需要进一步研究。

2.3.1 接缝中心及其左右边缘截面受力分析

选取接缝位置的左边缘、中心、右边缘3个截面,每

个截面分析其上、中、下3个节点的受力,结果见表5。

对于加铺层来说,通常有两种裂缝形式,一种是张拉裂缝;另一种是剪切裂缝。通过表5中水平纵向应变和剪切应变的最大值及其所在位置,判定接缝处加铺层可能的开裂形式;根据应变值分析,张拉裂缝由下向上开展,剪切裂缝可能在A、B两种工况中出现,且由上向下开展,工况C剪切应变相对较小,可不考虑。

从应变值上看,温度作用对张拉应变,尤其是加铺层底部张拉应变的增大,产生较大影响,而对剪切应变影响很小。同时发现,3种工况下,加铺层底在接缝处均承受较大的拉应变,其中工况C下最大,不考虑温度时为498 $\mu\epsilon$,考虑温度作用时为865 $\mu\epsilon$;A、B两种工况下,加铺层上、中、下3个层面均承受数值相当且较大的剪切应变,不考虑温度时最大为606 $\mu\epsilon$,最小为484 $\mu\epsilon$,考虑温度时最大为612 $\mu\epsilon$,最小为488 $\mu\epsilon$,且最大值出现在沥青加铺层顶,最小值出现在沥青加铺层底。鉴于接缝处加铺层底较中层及顶层承受更大的

拉应变,加铺层顶较中层及底层承受更大的剪切应变,可以推断,加铺层在接缝处可能会出现张拉或剪切裂缝,如果裂缝是由上及下的,有可能是剪切裂缝,若裂缝是由下及上开展的,则有可能是张拉裂缝。

2.3.2 接缝以外截面的受力分析

道路自建设之日起便暴露在自然环境中,使其不可避免地要长期受到温度变化的影响,故此,此处要重点探讨车轮荷载与温度耦合作用下,加铺层在使用过程中寻找3种工况下加铺层上、中、下3个层位应变最大值及其出现的位置,如表6所示。

表 5 降温前后各工况下水泥接缝附近各节点应变分析

工况	位置	不考虑温度						降温后					
		$\epsilon_x/\mu\epsilon$			$\gamma/\mu\epsilon$			$\epsilon_x/\mu\epsilon$			$\gamma/\mu\epsilon$		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
A	左	-217	—	216	-529	-541	-552	-38	255	547	-546	-539	-533
	中	-218	11	240	-573	-547	-521	-40	266	572	-579	-546	-514
	右	-206	28	263	-596	-540	-484	-26	285	596	-592	-540	-488
B	左	-222	19	260	-583	-572	-562	-41	270	580	-599	-570	-541
	中	-198	33	264	-606	-566	-525	-18	285	587	-612	-565	-518
	右	-187	50	287	-575	-534	-493	-46	303	611	-570	-534	-498
C	左	-342	78	498	-20	-42	-63	-172	347	865	-35	-41	-46
	中	-333	76	486	—	—	—	-165	344	853	—	—	—
	右	-342	78	498	20	42	63	-172	347	865	35	41	46

注: ϵ_x 为水平纵向应变; γ 为剪切应变。

表 6 各工况下加铺层最大应变及其位置

工况	Max- $\epsilon_x/\mu\epsilon$			Max- $\gamma/\mu\epsilon$		
	上	中	下	上	中	下
A	-96(距缝中10 cm)	349(距缝中3.5 cm)	778(距缝中8.5 cm)	579(距缝中0.5 cm)	546(缝中)	533(距缝中-0.5 cm)
	-99(距缝中9.5 cm)	350(距缝中3.5 cm)	782(距缝中8 cm)	612(缝中)	570(距缝中-0.5 cm)	541(距缝中-0.5 cm)
B	-172(距缝中±0.5 cm)	364(距缝中±2.5 cm)	876(距缝中±1 cm)	621(距缝中±12.5 cm)	541(距缝中±11.5 cm)	468(距缝中±12.5 cm)
	-172(距缝中±0.5 cm)	364(距缝中±2.5 cm)	876(距缝中±1 cm)	621(距缝中±12.5 cm)	541(距缝中±11.5 cm)	468(距缝中±12.5 cm)

结合表5、6可知:

(1) 工况B对于接缝区域剪切裂缝贡献最大,工况A次之,工况C最小,故研究接缝附近区域的剪切裂缝的防治,应重点考虑工况B。这与龙丽琴的研究结果相一致。

(2) 对于接缝区域以外的截面,无论是对张拉裂缝还是剪切裂缝,C工况的贡献均为最大,故研究接缝附近以外区域的裂缝防治,应重点考虑工况C。

(3) 由于原始接缝的存在,在车辆荷载与温度的共同作用下,容易在加铺层的以下位置产生裂缝:① 工况A下,加铺层顶面距接缝中心10 cm、加铺层底面距接缝中心8.5 cm的位置容易产生张拉裂缝,接缝宽度范围内易出现剪切裂缝(图3);② 工况B下,加铺层顶面距接缝中心9.5 cm,加铺层底面距接缝中心8 cm的位置容易产生张拉裂缝,接缝宽度范围内易出现剪切裂缝(图4);③ 工况C下,加铺层顶面距接缝中

心左右各 0.5 cm,加铺层底面距接缝中心左右各 1 cm 的位置容易产生张拉裂缝,加铺层顶和底距接缝中心左右各 12.5 cm 位置易出现剪切裂缝(图 5)。

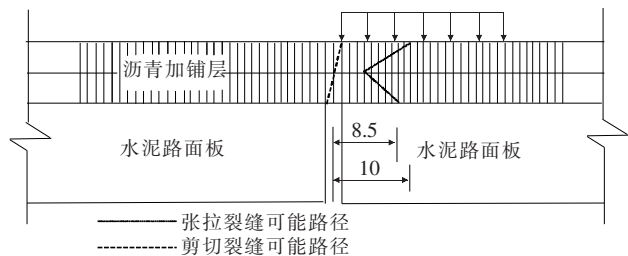


图3 考虑温度作用工况 A 加铺层裂缝可能开展路径(单位:cm)

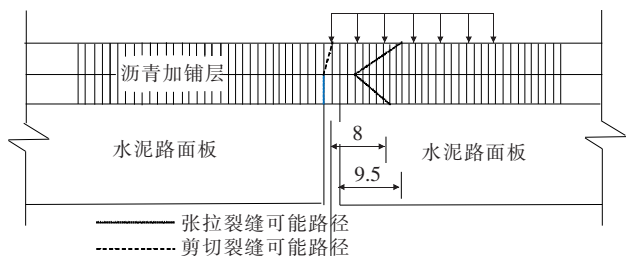


图4 考虑温度作用工况 B 加铺层裂缝可能开展路径(单位:cm)

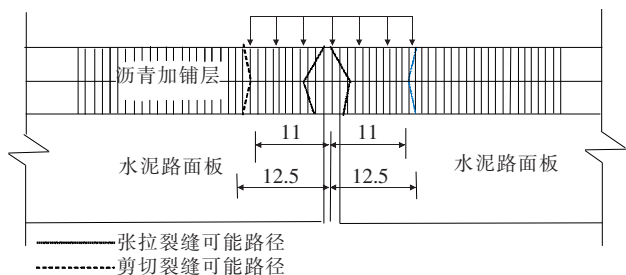


图5 考虑温度作用工况 C 加铺层裂缝可能开展路径(单位:cm)

鉴于行驶的车辆经过 3 个位置过程中,行车荷载保持连续,结合上述分析,可知加铺层的开裂体现在以下区域:加铺层底面距接缝中心 10 cm 区域内既可能出现剪切裂缝也可能出现张拉裂缝;距接缝中心 10~12.5 cm 区域内可能出现剪切裂缝。

(4) 接缝附近裂缝的形式相对复杂。在接缝附近,工况 C 易产生的张拉裂缝的位置与工况 A、B 产生的剪切裂缝的位置相距较近,二者极易贯通。

由此可得出加铺层裂缝并非仅在旧水泥路面接缝区域出现,还有可能出现在远离接缝的某一位置;同时裂缝的开展也并非沿直线发展,理论上它的可能路径

如图 3~5 所示,但实际由于沥青混合料的构成并非均质连续,由于大粒径骨料的存在,可能会导致裂缝的开展路线受阻而发生改变,从而使裂缝的开展并非理想的直线,也非理论分析的折线,而呈不规则形状。

3 结语

“白加黑”复合式路面沥青加铺层的反射裂缝主要有剪切裂缝与张拉裂缝两种形式。降温导致水泥混凝土路面板收缩,增大旧水泥路面板接缝的宽度,使沥青加铺层在接缝附近拉应变显著增加,最大拉应变为 $853 \mu\epsilon$,最大增幅达 138%,因此,降温是导致沥青加铺层出现张拉裂缝的主要原因。降温对剪切应变的影响不足 1%,因此,剪切裂缝主要由车辆荷载所引起。在车辆连续通过接缝过程中,沥青加铺层反射裂缝主要出现在距接缝 12.5 cm 范围内,近似车轮接地尺寸的 1/2。因此,这个区域将是“白加黑”路面沥青加铺层防治反射裂缝研究的重点区域。裂缝的开展形式,对于张拉裂缝为自下而上,表现为下宽上窄,剪切裂缝为自上而下,表现为上宽下窄。在接缝附近,由于易出现剪切裂缝的位置与易出现张拉裂缝的位置相距较近,二者极易贯通,而不易区分。

参考文献:

- [1] 杨德灿,赵文婷,李黎杰,等.旧水泥路面沥青加铺层反射裂缝有限元分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009(1).
- [4] 刘仕贵,于新.结构层参数对 SAMI-R 防反射裂缝影响有限元分析[J].华东交通大学学报,2013(2).
- [5] 王庆波,寇晓峰,刘涛.简述公路地质雷达在哈阿公路路面厚度检测中的应用[J].黑龙江交通科技,2001(6).
- [6] 唐颖.基于 SAMI-R 的旧水泥板加铺沥青层力学分析[J].郑州大学学报(工学版),2014(3).
- [7] 张云龙,聂忆华,徐望国,等. Ansys 分析路面结构力学响应的可靠性[J].湖南交通科技,2013(3).
- [8] 虞峥,彭德清,谢鑫华.橡胶沥青应力吸收层设计[J].中外公路,2015(2).
- [9] 杨学良,刘伯莹.沥青路面温度场与结构耦合的有限元分析[J].公路交通科技,2006(11).
- [10] 龙丽琴.沥青加铺层荷载应力和温度应力的三维有限元研究[D].华中科技大学硕士学位论文,2005.
- [11] 安丰伟.水泥混凝土路面耐久性评价方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2011.