

温度与移动荷载作用下特重交通 RCC 基层沥青路面结构响应分析

高晓伟^{1,2}, 颜薇^{1,2*}, 宋琚^{2,3}, 任东亚^{1,2}, 艾长发^{1,2}

(1.西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2.道路工程四川省重点实验室;
3.厦门百城建设投资有限公司)

摘要: 为便于传统半刚性基层沥青路面改造方案结构优选,使改造后的路面能更好地承受特重交通与环境温度作用,针对碾压混凝土(RCC)基层以及组合式基层沥青路面两种改造方案,利用 ABAQUS 有限元软件进行其在大气温度作用下的路面结构温度场预估、温度应力分析,以及典型温度场与移动荷载的耦合分析。结果表明:① 大气温度对路面温度场的影响主要集中在面层,尤其是中上面层,温度变化梯度对温度应力影响较大;② 温度应力主要集中在基层及以上结构层,面层在温度较低时承受拉应力,基层顶面承受较大的温度压应力;③ 相比于组合式基层,RCC 基层沥青路面在温度与移动荷载共同作用下,其沥青中下面层剪应力、沥青层层底弯拉应变以及土基顶部压应变等均具有更为明显的力学优势,且抗疲劳开裂和永久变形损伤预期寿命最长。RCC 基层沥青路面可作为特重交通路面改造工程的优选结构。

关键词: 沥青路面; 碾压混凝土(RCC)基层; 温度荷载耦合; 结构响应; 结构优选

在日益增长的交通量和重载车辆的反复作用下,沥青路面易被破坏。为恢复路面性能,延长修复后路面的使用寿命,针对交通特点与环境条件,合理选择路面改造措施是关键。其中,碾压混凝土(RCC)基层沥青路面由于其施工便捷以及良好的力学性能,在路面改造以及低等级路面中使用较广。章佩佳认为 RCC 基层使应力在基层和面层之间进行了重分布,有利于保护基层,提高结构承载能力;黄淮生认为 RCC 基层的厚度取 18~24 cm 较为适宜,在基层与沥青面层之间设置土工织物或级配碎石过渡层能够有效延长结构使用寿命;谢光宁认为在广东高温多雨地区 RCC 基层路面相比柔性路面在解决重载交通下沥青路面耐久性的问题上更有优势;美国学者 Delatte 提出由 RCC 和热拌沥青(HMA)组成的复合式路面系统在承受重载交通时耐久性表现出色;Plati 认为 RCC 的压实模式(静态,动态,两者结合)以及温度条件对其所在路面结构的承载力和使用寿命有较大影响。以上研究为 RCC 基层在新建与改造路面工程中的应用提供了理

论与实践支撑,但由于 RCC 材料温度敏感性较强,在高温和大温差下会在内部产生较大温度应力甚至影响结构的力学性能与使用寿命,而目前关于 RCC 基层沥青路面在温度以及温度与移动荷载耦合作用下的动态力学响应研究较少,为此,该文依托南方某市某特重交通市政道路路面改造工程,利用 Abaqus 软件对 RCC 基层、组合式基层以及传统半刚性基层沥青路面进行动态力学响应和温度+移动荷载耦合分析,对比 3 种结构的性能优劣。

1 路面结构方案和计算模型

1.1 路面结构方案

图 1 为 3 种路面结构方案。其中结构 1 为原路面半刚性基层结构,由于较大的交通量以及重载车辆的长期作用导致结构 1 基层以上结构遭到破坏;结构 2、3 为两种改造方案,分别为 RCC 基层和组合式基层沥青路面结构。

收稿日期:2018-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378438);企事业单位合作科技项目(编号:KYJS-2017-001)

作者简介:高晓伟,男,硕士研究生.E-mail:15828160831@163.com

* 通信作者:颜薇,女,硕士研究生.E-mail:2020153171@qq.com

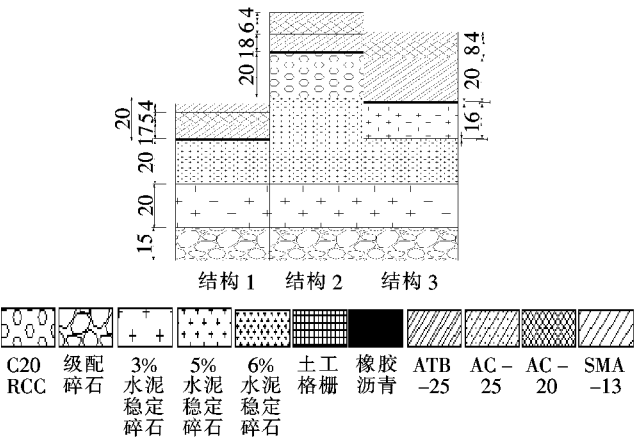


图 1 3 种路面结构(单位:cm)

1.2 计算模型

图 2 为 3 种路面结构采用有限元计算模型,3 种结构均长 8 m,宽 6 m,土基厚度 5 m,X 方向为荷载移动方向,Y 方向为路面厚度方向,Z 方向为道路横断面方向。其中半刚性基层路面总厚 72 cm,组合式基层路面总厚 104 cm,RCC 基层路面总厚 114 cm,其基层有 1 cm 切缝,切缝之间没有力学传递。计算模型为连续模型,各结构层之间完全黏结(Tie 约束)。

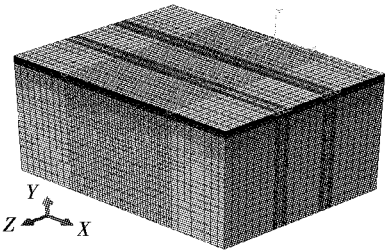


图 2 有限元计算模型

1.3 气象参数与材料热物性参数

沥青路面温度场的计算是一个复杂的过程,受许多因素影响,其中外部环境影响因素有:外部环境 24 h 气温变化、日太阳辐射总量 Q 、日平均风速 v 以及日照时间 c 。以 Abaqus 有限元分析软件为计算平台,借助用户子程序 FILM、DFLUX,考虑在太阳辐射、路面有效辐射、气温及对流热交换影响作用下,模拟周期性变温条件下路面结构温度场。传热模型为一维传热,热流沿着路面竖向进行传递,辐射面为路面结构的上表面。参考文献[7]、[8]取值,路面发射率 ε 取 0.9,太阳辐射吸收率 α_s 取 0.85,Stefan-Boltzmann 常数取 $2.041\ 092\times 10^{-4}\text{ J}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$,绝对零度值 T_z 取 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$,其余气象参数与材料的热物性参数如表 1、2 所示,其中气象参数选取 7 月夏季高温时期。

表 1 气象参数

时刻	气温/ $^{\circ}\text{C}$	时刻	气温/ $^{\circ}\text{C}$	时刻	气温/ $^{\circ}\text{C}$
01:00	28.2	09:00	29.6	17:00	34.5
02:00	27.5	10:00	30.3	18:00	33.5
03:00	27.3	11:00	31.2	19:00	32.9
04:00	27.2	12:00	33.4	20:00	31.8
05:00	27.0	13:00	34.9	21:00	30.9
06:00	27.9	14:00	35.9	22:00	29.6
07:00	28.5	15:00	35.8	23:00	29.3
08:00	29.0	16:00	34.8	24:00	29.2

注: $Q=25.8\text{ MJ}/\text{m}^2$, $c=11.8\text{ h}$, $v=2.65\text{ m}/\text{s}$ 。

表 2 材料热物理参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	热传导率 $k/[\text{J}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	热容量 $C/[\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$
SMA-13	2 300	4 680	924.9
AC-20	2 430	5 040	900.0
AC-25	2 600	4 187	921.1
ATB-25	2 380	4 320	815.0
RCC	2 380	4 500	970.0
橡胶沥青	2 240	4 680	940.0
土工格栅	950	1 440	2 301.0
水泥稳定碎石	2 300	5 616	911.7
级配碎石	1 900	4 680	810.0
路基	1 800	5 616	1 040.0

首先计算路面温度场,再采用 Abaqus 提供的顺序热力耦合分析方法进行温度应力分析。沥青面层材料 SMA-13、AC-20 以及 AC-25 采用广义 Maxwell 黏弹性本构模型进行模拟,使用广义 Prony 级数拟合,时温等效原理采用 Williams-Landel-Fer 方程(WLF 方程)拟合,其余结构层材料采用线弹性模型。

WLF 方程:
$$\lg a_T = \frac{-C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)}$$

式中: T_0 为参考温度,这里取 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, C_1 和 C_2 为试验确定系数。

除了常规的力学参数外,材料线性膨胀系数尤为重要,各类材料热力学参数如表 3~6 所示。另外,RCC、土工格栅、水泥稳定碎石、级配碎石、土基等几种材料的线膨胀系数受温度影响可忽略不计,该研究分别拟定为 $1.0、6.0、0.98、0.5、0.45(\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C})$ 。

1.4 移动荷载模式

移动荷载通过 Abaqus 子程序 DLOAD 以及 UTRACLOAD 实现,荷载移动区域为图 2 中结构表

表 3 路面结构材料力学参数

材料	层位	动态模量/MPa	泊松比
SMA-13	上面层	—	0.30
AC-20	中面层	—	0.30
AC-25	下面层	—	0.30
ATB-25	下面层	13 000	0.35
RCC	基层	25 500	0.20
橡胶沥青	封层	10 000	0.35
土工格栅	封层	10 000	0.40
6%水泥稳定碎石	基层	16 000	0.25
5%水泥稳定碎石	基层	15 000	0.25
3%水泥稳定碎石	基层	13 000	0.25
级配碎石	基层	400	0.35
压实土	土基	250	0.40

表 5 黏弹性材料 WLF 方程参数

混合料类型	C_1	C_2
SMA-13	10.44	126.62
AC-20	11.85	121.67
AC-25	17.73	169.33

表 4 黏弹性材料 Prony 级数

τ_i/s	不同沥青面层材料的 g_i		
	SMA-13	AC-20	AC-25
0.001	0.262 05	0.300 98	0.345 06
0.01	0.235 61	0.206 57	0.173 69
0.1	0.220 33	0.222 48	0.224 91
1	0.204 57	0.193 9	0.181 83
10	0.034 59	0.035 15	0.035 77
100	0.028 80	0.027 22	0.025 43

注： g_i 为材料剪切常数； τ_i 为松弛时间；表 3~5 参数均基于 20℃；瞬态模量：SMA-13：11 100 MPa；AC-20：14 500 MPa；AC-25：13 500 MPa。

面 4 m 深色部分，沿 X 轴方向，采用标准 BZZ-100 单轴双轮荷载，并将接地面积由当量圆简化为面积相当的矩形，如图 3、4 所示。接地压力取为 0.7 MPa，水平方向压力取 0.35 MPa。所有计算数据取自各结构层表面，温度场及温度应力取最大值，温度荷载耦合取路面中间轮载中心处。

表 6 路面结构材料线膨胀系数

材料	不同温度(℃)下材料的线膨胀系数/($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)									
	-26	-20	-10	0	10	15	20	25	30	40
SMA-13	2.2	2.7	3.8	4.3	3.5	3.2	2.9	2.6	2.3	2.0
AC-20	1.3	1.6	2.1	2.6	2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0
AC-25	1.2	1.5	1.8	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
ATB-25	1.0	1.2	1.4	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
橡胶沥青	1.2	1.5	2.0	2.5	2.4	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5

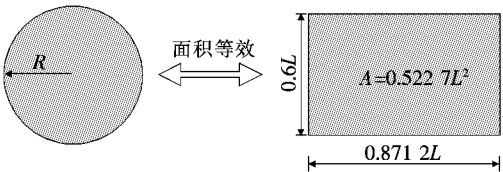


图 3 荷载接地面积转换

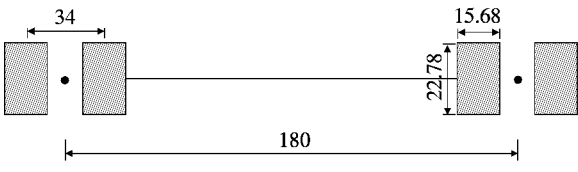


图 4 单轴双轮荷载(单位:cm)

2 温度行为分析

2.1 温度场分析

图 5 为 3 种路面各结构层顶面的温度在 24 h 中的变化情况。由图 5 可知：半刚性基层、RCC 基层和组合式基层 3 种路面结构的温度场分布差别不大。在夏季高温条件下，24 h 内，路面结构内的温度最大值

由基层变化到上面层，再由上面层变化到基层。面层尤其是上面层温度变化幅度最大，基层及以下结构层变化幅度较小，RCC 切缝处并无明显的温度梯度变化。路面结构内的最低温度出现在 05:00 时左右，日出之后结构内温度明显上升，最高温度出现在 14:00 时左右，日落之后温度缓慢下降。

2.2 温度应力分析

图 6 为 3 种路面各结构层顶面的温度应力在 24 h

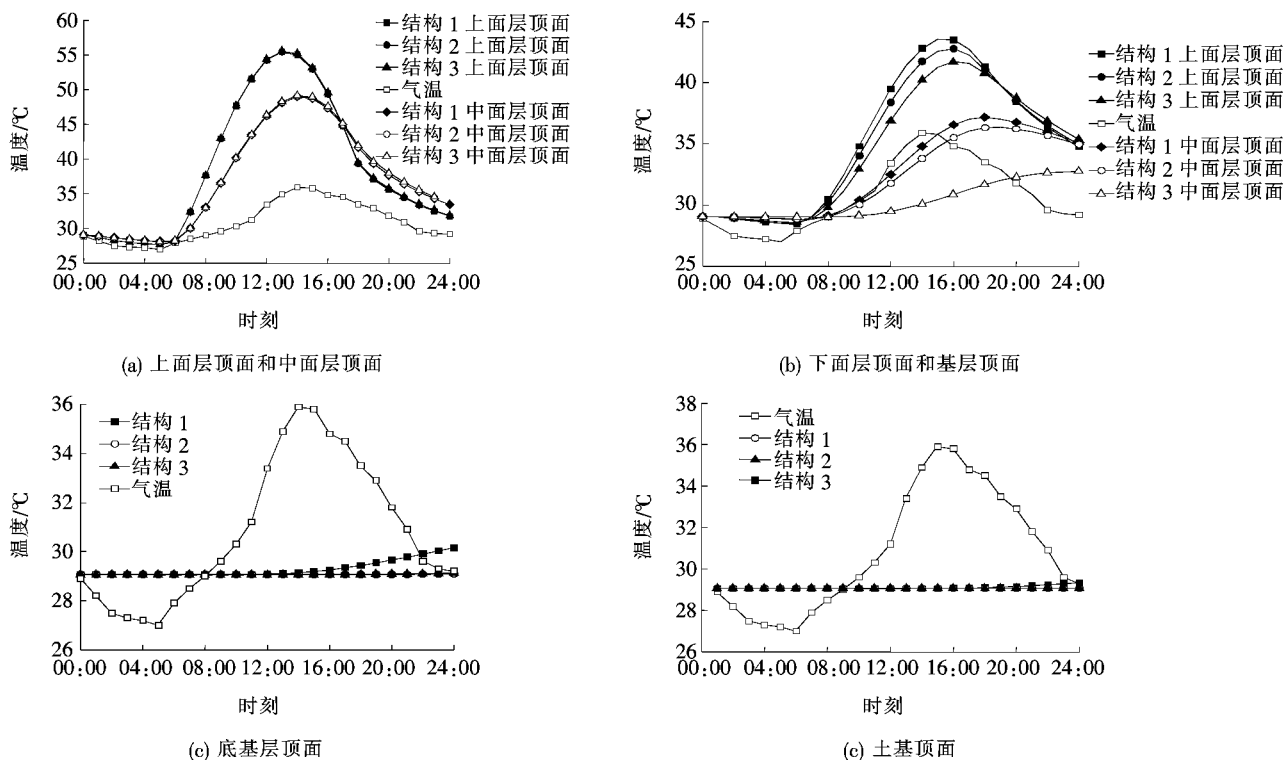


图 5 不同路面结构温度场分布

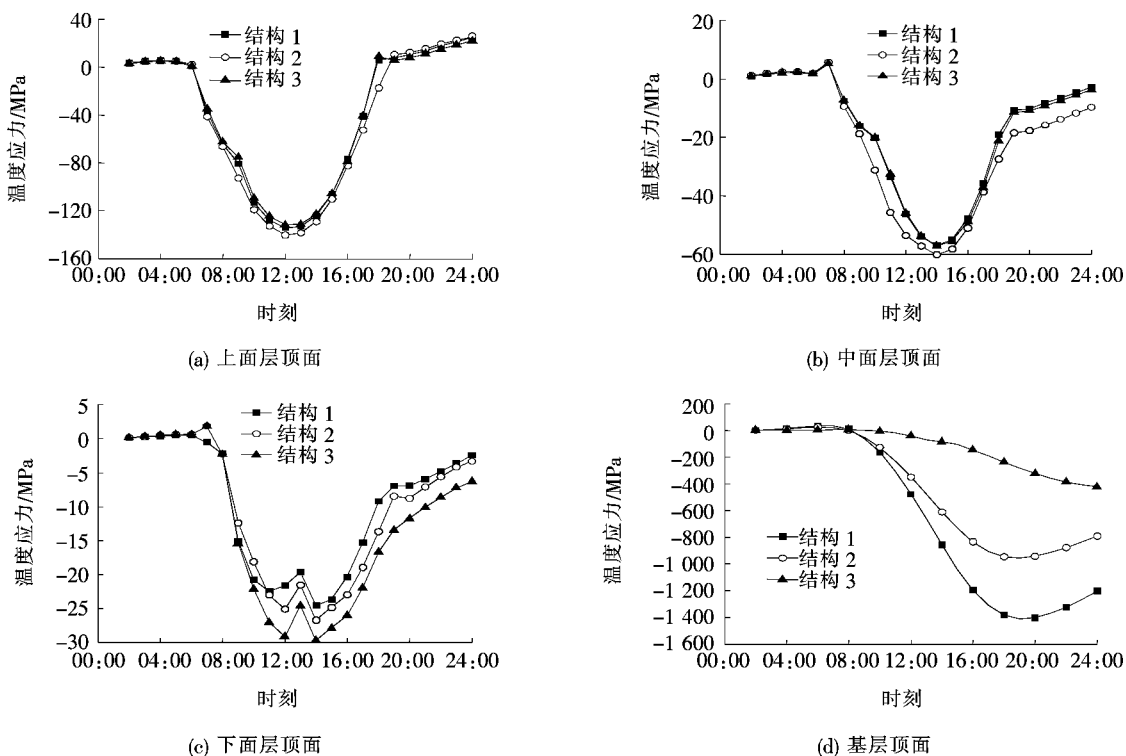


图 6 不同路面结构温度应力分布

内的分布情况,温度应力主要集中在基层及以上结构层。

从图 6 可看出:各结构层的温度应力变化趋势与

大气温度变化密切相关。从 0:00 时到 06:00 时左右,由于大气温度不断下降,面层承受较小的拉应力,06:00 时以后气温快速上升,拉应力快速减小,压应力

迅速增大,并在 13:00 时左右达到最大值,随后随着大气温度降低,压应力开始快速下降,并会呈现出拉应力增大的趋势。基层与面层的温度应力变化规律大致相似,但是在 19:00 时左右基层顶面压应力达到最大,其值是面层压应力最大值的 10~20 倍,基层是温度变化引起压应力最明显的路面结构层。

3 种不同结构面层的温度应力随时间的变化情况大致相同,但是在基层表面,原路面半刚性基层结构(结构 1)承受的压应力明显大于碾压混凝土基层和组合式基层路面改造结构(结构 2、3),两种改造结构较原结构的力学优势非常明显,由于组合式基层路面下面层为 20 cm ATB-25 沥青碎石过渡层,所以面层力学性能较好,基层顶面的压应力较小。碾压混凝土基层路面的 RCC 切缝处并无明显的应力集中现象,不会影响 RCC 基层的承载能力,温度应力最大值 1 312 kPa 出现在切缝靠路面中间处,最小值 634.6 kPa 出现在两侧路面边缘处。

3 温度与移动荷载耦合行为分析

选取 14:00 时研究典型温度场与移动荷载共同作用,荷载移动速度 20 m/s,移动区域长 4 m,移动时间为 0.2 s。计算点位于轴载中心,荷载移动到该点正上方时间为 0.1 s。

3.1 沥青层剪应力分析

图 7 为移动荷载与温度共同作用下 3 种路面结构下面层顶部的剪切应力随荷载移动时间的变化趋势。

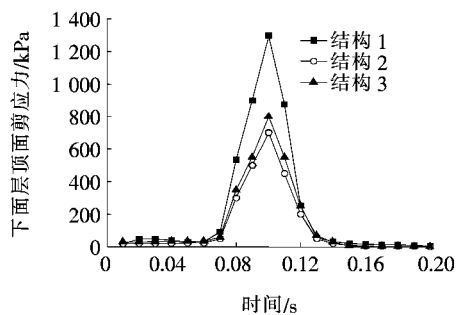


图 7 不同路面下面层顶面剪切应力

由图 7 可得:随着荷载开始移动,剪应力非常小,几乎等于 0,当荷载移动到计算点附近时剪应力急剧增大,之后又急剧减小至 0。原路面结构的下面层顶面剪应力最大值明显大于结构 2 和 3,其峰值达到 1.296 MPa,分别是后两者的 1.85 倍和 1.63 倍,后两者差别不大。

剪应力主要集中在沥青面层,最大值出现在中、下

面层之间,是使路面产生剪切破坏的内因,在较高的温度条件下,沥青路面容易遭受剪切破坏,所以尤其在南方高温多雨地区,设计路面结构时要尽可能控制剪应力,以免由于路面剪切破坏而降低路面的承载能力和使用性能。从抗剪切性能来看,结构 2 和 3 更优。但结构 2 的切缝两侧尖端处容易有剪切应力集中造成剪切破坏,需提高切缝处抗剪能力,如在 RCC 板缝处设置抗剪钢筋。

3.2 沥青层底拉应变分析

图 8 为移动荷载与温度共同作用下 3 种路面结构沥青层层底弯拉应变随荷载移动时间的变化趋势。

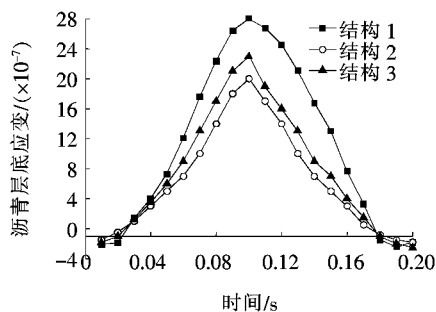


图 8 不同路面结构沥青层底应变

从图 8 可以看出:荷载距离计算点较远时,沥青层层底承受较小压应变,当荷载靠近计算点时,沥青层层底的压应变越来越小,弯拉应变越来越大,在 0.1 s 时到达峰值,之后随着荷载移动,弯拉应变快速减小。3 种结构中结构 1 的弯拉应变峰值最大,结构 2 和 3 较小,从沥青层层底的弯拉应变情况来看,结构 2 的力学性能最优,承载能力最好,结构 3 次之,结构 1 最差。

3.3 土基顶面压应变分析

图 9 为移动荷载与温度共同作用下 3 种路面结构土基顶部压应变随荷载移动时间的变化趋势。

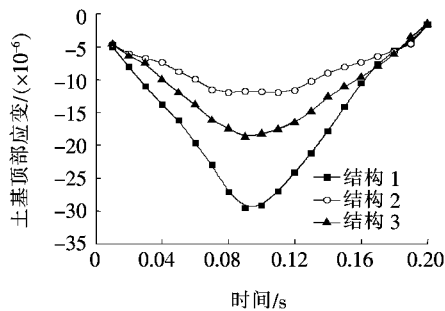


图 9 不同路面结构土基顶部应变

从图 9 可以看出:随着荷载移动,土基顶部压应变逐渐增大,并在荷载到达计算点附近时达到最大值,

之后又逐渐减小。3 种结构中结构 1 的土基顶部压应变峰值最大,达到 29.22×10^{-6} ,分别是结构 2 和 3 的 2.5 倍和 1.6 倍。从土基顶部压应变情况来看,结构 2 力学性能最好,结构 1 最差,结构 3 居中。

4 损伤寿命预估

在路面结构的损伤分析中,基于 Miner 线性损伤模型,沥青层层底拉应变和土基顶部压应变分别用于疲劳开裂分析和永久变形分析。疲劳开裂的破坏极限用式(1)表示:

$$N_f = 0.414(\epsilon_t)^{-3.291}(E)^{-0.854} \quad (1)$$

式中: N_f 为防止疲劳开裂的允许荷载重复作用次数; ϵ_t 为沥青层底部的拉应变; E 为沥青层的弹性模量。

永久变形的破坏极限用式(2)表示:

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9}(\epsilon_c)^{-4.447} \quad (2)$$

式中: N_d 为限制永久变形允许通过的荷载重复作用次数; ϵ_c 为土基顶部压应变。

一年中路面的总损伤率用式(3)表示:

$$D_r = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \quad (3)$$

式中: D_r 为路面一年内的总损伤率; p 为时期数; m 为荷载组数; $n_{i,j}$ 为 i 时期荷载 j 的预期重复作用次数; $N_{i,j}$ 为 i 时期荷载 j 的允许重复作用次数。

根据依托工程现场统计的交通量,计算得到路面模型一年的荷载重复次数为 7 830 345 次,一年末总损伤率的倒数即为路面的预期寿命。3 种路面结构的损伤分析结果如表 7 所示。

表 7 损伤分析结果

结构类型	损伤类型	层底拉应变/层顶压应变/ $(\times 10^{-6})$	允许作用轴载次数/ $(\times 10^6 \text{ 次})$	年末损伤率	预期寿命/年
结构 1	疲劳开裂损伤	36.18	71.01	1.103×10^{-1}	9.71
	永久变形损伤	227.8	27.72	2.825×10^{-1}	3.54
结构 2	疲劳开裂损伤	27.01	515.15	1.52×10^{-2}	65.79
	永久变形损伤	96.33	344.95	2.27×10^{-2}	44.05
结构 3	疲劳开裂损伤	26.92	525.53	1.49×10^{-2}	67.11
	永久变形损伤	108.9	292.18	2.68×10^{-2}	37.31

注:表中带方框的数据为各方案对应的由控制损伤模式所决定的寿命,即设计计算寿命。

沥青层层底的拉应变越大,疲劳开裂损伤越大,疲劳寿命越小;土基顶部的压应变越大,永久变形损伤越大,永久变形寿命越小。所以,在沥青路面结构的设计施工尤其是改造提质过程中,要严格控制沥青层层底的弯拉应变和土基顶部的压应变,以免由于产生疲劳开裂破坏或者永久变形破坏而影响路面的正常使用。从表 7 可得,从路面疲劳开裂和永久变形情况来看,结构 2 力学性能最好,使用寿命最长。

5 结论

(1) 3 种结构的路面温度场分布大致相同;随着大气温度的变化,面层尤其是上面层温度变化幅度最大,基层及以下结构层变化幅度较小;各结构层的温度变化梯度大小对温度应力有较大影响。

(2) 3 种结构的温度应力变化情况大致类似;温度应力主要集中在基层及以上结构层,且基层承受较

大的由温度变化引起的压应力。面层在日出前以及日落后气温较低时,承受较小的拉应力,气温升高时,压应力逐渐增大。

(3) 沥青下面层顶面剪应力、沥青层层底弯拉应变以及土基顶部压应变指标均在荷载移动过程中先增大后减小,荷载移动到计算点正上方时达到最大值。

(4) 在结构 2 中,RCC 基层切缝处易出现剪切应力应变集中造成基层剪切破坏,可在切缝之间设置抗剪钢筋以提高基层切缝处抗剪能力。

(5) 综合各结构的力学响应以及损伤寿命预估,结构 2 即碾压混凝土(RCC)基层沥青路面最优,结构 3 即组合式基层沥青路面次之。为保证依托工程路面改造方案能适应特重交通荷载要求,推荐使用结构 2。

参考文献:

- [1] 刘鹏.低等级公路碾压混凝土路面结构设计研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2014.

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.007

考虑公路等级的沥青路面性能衰变预测方法

周育名¹, 李金明², 李平¹, 陈致远¹, 段筱娟¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中国公路工程咨询集团有限公司)

摘要: 为了研究沥青路面使用性能的衰变规律,准确预测未来路面病害发展状况。根据沥青路面面层厚度、基层厚度的不同,将某省国省干线 2011—2014 年路面病害检测数据进行归类,分别采用 4 种路面性能衰变模型,以时间和累计当量轴次作为自变量进行回归分析,根据回归模型预测了 2015 年路面 PCI(路面损坏状况指数)值,与实际检测值进行了对比。结果表明:在不同类别中,以累计当量轴次为自变量时,拟合的衰变曲线相关系数均高于以时间为自变量的模型;在 2015 年路面状况预测值与实际值的对比分析中,高速公路指数形模型的差值最小,其他等级公路 S 形模型相对较好,但整体情况劣于高速公路;因此,对于高速公路路面性能,推荐采用累计当量轴次为自变量的指数形模型进行预测;对于其他等级公路,推荐采用累计当量轴次为自变量的 S 形模型进行预测。

关键词: 道路工程;性能衰变模型;回归;沥青路面;累计轴载次数

1 前言

近年来,中国公路建设取得了飞速发展,截至 2017 年底,中国公路总里程为 477.35 万 km,养护里程 467.66 万 km,占总里程的 97.9%。伴随着公路大规模建设接近尾声,公路的养护与管理越来越得到了

人们的重视。交通运输部“十二五”公路养护管理发展规划提出,在“十二五”期间要基本建立国道及高速养护管理科学决策体系,这期中关键的一步就是路面使用性能的预测,科学决策是建立在准确预测路面性能的基础上,没有准确的性能预测,决策往往会造成养护资金的浪费、路面使用质量下降及使用费用上升等现象。

- *****
- [2] 章佩佳,何兆益.复合碾压混凝土路面荷载应力分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2010(3).
- [3] 黄淮生.碾压混凝土基层切缝效应模拟研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2012.
- [4] 谢光宁.碾压混凝土基层在高速公路中的应用研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2014.
- [5] Delatte, Norbert. Simplified Design of Roller-Compacted Concrete Composite Pavement[J].Journal of Transportation Research Record, 2004:57-65.
- [6] Plati, Christina. Influence of Different Roller Compaction Modes on Asphalt Mix Performance[J].International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(1):64-70.
- [7] 艾长发,邱延峻,毛成,等.考虑层间状态的沥青路面温度

- 与荷载耦合行为分析[J].土木工程学报,2007(12).
- [8] 艾长发,黄大强,高晓伟,等.高寒地区沥青路面温度行为数值分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2017(2).
- [9] 国家气象局数据中心.地面气象资料数据集[Z],2017.
- [10] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [11] 陈宝,吴德军,刘翥.沥青路面结构的最大剪应力[J].长安大学学报:自然科学版,2010(6).
- [12] 肖川,曾杰,艾长发.基于动力特性的典型沥青路面性能评价与结构优化[J].中外公路,2016(6).
- [13] 郭芳,付宏渊,邵腊庚.基于环境温度变化的混合式基层沥青路面结构疲劳损伤分析[J].中南大学学报:自然科学版,2015(5).

收稿日期:2018-03-24

基金项目:长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金项目(编号:kfj150108);湖南省教育厅科学研究项目(编号:16C0054);国家自然科学基金资助项目(编号:51878075);广西科技计划项目(编号:桂科 AC16380111);广西交通科技项目(编号:桂交科 2013-100-28)

作者简介:周育名,女,博士,讲师.E-mail:zhouyuming0503@163.com