

文章编号:1005-0523(2020)05-0023-08

大温差作用下寒区路面温度应力行为研究

郭 创¹,周玉博¹,邓展伟²

(1. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司,河南 郑州 450000;2. 长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了了解在内蒙古寒区路面内部温度应力的变化,研究不同基层类型在寒区温度应力行为及结构性能,借助 Abaqus 软件,利用顺序耦合法获得路面在日温差为 20 ℃,30 ℃,40 ℃的大温差环境下的温度应力,并分析不同基层路面在温度和动载耦合作用下的力学响应。结果表明:组合式基层路面在寒区大温差环境下路面力学性能最好,且在温度和动载耦合作用下仍然具有优势,各层温度应力均最小,且在低温和动载耦合作用下所有力学指标均较小,在高温和动载耦合作用下沥青层剪应力表现较好。

关键词:有限单元法;大温差;温度场;温度应力;耦合作用

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

本文引用格式:郭创,周玉博,邓展伟. 大温差作用下寒区路面温度应力行为研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(5):23-30.

Citation format:GUO C,ZHOU Y B,DENG Z W. Study on temperature stress behavior of pavement in cold area under large temperature difference[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):23-30.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.004

沥青路面的车辙、低温裂缝以及基层反射裂缝等路面损坏均与温度作用相关,国内外对温度应力的研究亦有相当的进展,但寒冷地区不同基层路面的温度应力行为及适用性尚且较少。严作人^[1]将热量的传递假设为仅向路面深度传递的一维热传导,考虑环境气象学与热传导学,获得了路面温度的热传导方程,建立了路面温度场预估模型;刘继忠^[2]运用气象学和传热学的基本理论,建立了沥青路面层状体系的热传导方程,借助有限元计算平台,采用正交试验方法分析了高海拔路面温度场及温度应力的最优水平,最优水平组合、影响因素的主次顺序;艾长发等^[3]利用有限元建立路面平面应变模型,讨论了有限元方法建模的合理的材料热属性参数、模型尺寸以及边界条件,并分析了高寒地区路面温度场变化与以上各参数的相关性;郝培文等^[4]详细讨论了不同降温幅度弹性模量及温缩系数随温度变化的特性,在此基础上建立低温下沥青路面三维有限元模型,分析降温、弹性模量及温缩系数参数对沥青路面温度应力的影响规律。

综上所述,很多学者只是讨论了在典型气候条件下路面温度应力在不同路面结构下的规律,而忽略在极端或大降温气候环境下路面内部温度应力的变化。以内蒙古通辽地区温度特征作为寒区代表性气候,开展日温差在 20 ℃,30 ℃,40 ℃下不同路面结构温度应力变化的研究,借助 Abaqus 有限元计算软件模拟寒区连续周期性变温条件下的沥青路面温度场,采用顺序耦合方法获得结构内的温度应力,分析不同上基层材料构成的不同类型路面结构在大温差作用下的温度应力行为。

1 用于温度分析的路面结构及参数确定

1.1 路面结构的确定

选取内蒙古寒冷地区处在运营期的典型半刚性基层路面结构(4 cmAC-13+5 cmAC-20+7 cmAC-25+20 cm 水泥稳定碎石+32 cm 水泥稳定碎石),为了便于探讨不同基层路面在温度作用下的温度应力,排除结

收稿日期:2020-05-13

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2017JM5034)

作者简介:郭创(1993—),男,助理工程师,硕士,研究方向为道路工程。E-mail:2510845416@qq.com。

通信作者:邓展伟(1994—),男,硕士研究生,研究方向为道路工程。E-mail:2510845416@qq.com。

构层厚度和层位对温度作用的影响,将该半刚性基层结构(结构 I)的上基层分别替换为等厚度的沥青稳定碎石和级配碎石组成结构 II 和结构 III。3 种结构厚度相同仅上基层所用材料不同,分别作为半刚性、倒装式、结合式基层路面的代表型结构。

1.2 温度分析的有限元三维模型

Abaqus 的计算模型尺寸会对温度分析结果产生影响,根据王志刚^[5]的研究;随着计算模型长度的增加,温度应力逐渐减小,最终趋向于稳定。经过试算,当计算模型长度达到 7 m 时每增加 1 m 温度应力减小幅度为 0.06%。基于此,计算模型尺寸为:长 7 m,宽 7 m,路基深度为 6 m,模型用于温度场分析的单元格类型为 DC3D20,用于温度应力分析时的单元格形式为 C3D20R,模型的边界条件为:行车方向(z 轴)对 z 方向位移施加约束,横断面方向(x 轴)对 x 方向位移施加约束,路基底面为完全固定。

1.3 温度分析的有限元参数

1.3.1 气象参数

与路面温度场相关的环境参数主要是提供第一类和第二类边界条件的计算模型参数(编写 DFLUX 和 FILM 子程序),根据通辽地区气象资料,进行温度分析的环境参数确定如下。

1) 太阳辐射。冬季寒冷季节取日太阳辐射总量 Q 为 8.57,实际有效日照时数 c 为 7.35 h。夏季炎热季节取日太阳辐射总量 Q 为 22.5,实际有效日照时数 c 为 9.80 h。

2) 气温及对流热交换。日平均风速确定为夏季 3.5 m/s,冬季 4.0 m/s。日气温小时值取通辽市对应温差下的日气温小时值。

3) 路面有效辐射。查阅相关文献^[6-7],太阳辐射吸收率取 0.90,路面发射率 0.81,绝对零度值 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, Stefan-Boltzmann 常数取 2.041×10^{-4} 。

1.3.2 材料参数

目前对于温度应力的计算,应用最为广泛的是基于准弹性梁的温度应力计算公式

$$\sigma(T_{t_2}) = \sum_{T_2}^{T_{t_1}} \alpha(T) E(T) \Delta T \quad (1)$$

式中: T_{t_1}, T_{t_2} 分别为 t_1 和 t_2 时刻的温度值; $\alpha(T)$ 为温度为 T 时沥青混合料的温缩系数; $E(T)$ 为温度为 T 时的劲度模量; ΔT 为从 t_1 到 t_2 的温度差; $\sigma(T_{t_2})$ 为累计温度应力。

为此,参考孙立军等^[8]建立的沥青混合料模量反算方法和王月峰等^[9]建立的动态模量温度修正系数确定不同温度下的动态模量(劲度模量)值。对材料不同温度下模量值确定如表 1。

表 1 材料模量参数表
Tab.1 List of material modulus parameters

参数	温度/ $^{\circ}\text{C}$									
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
AC-13	53 500	44 600	35 700	22 700	14 300	9 000	5 600	3 500	2 200	1 400
AC-20	50 500	42 100	33 700	23 900	14 200	8 500	5 000	3 000	1 800	1 000
AC-25	47 600	39 600	31 700	33 400	16 300	8 000	3 900	1 900	930	450
ATB-25	41 650	34 720	27 790	29 300	14 300	7 000	3 420	1 600	810	400
水泥稳定碎石	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
级配碎石	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
土基	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

路面各层材料的温缩系数与泊松比,参考相关的实测研究^[10-13]与一些学者所作的模拟计算所采用的参数,见表2、表3。

表2 材料温缩系数参数表
Tab.2 List of material modulus parameters

参数	温度/°C									
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
沥青混合料	1.6	1.9	2.2	2.5	2.9	2.7	2.5	2.3	2.0	1.7
水泥稳定碎石	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
级配碎石	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
土基	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

表3 材料泊松比参数表
Tab.3 List of material poisson's ratio parameters

参数	温度/°C									
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
沥青混合料	0.071	0.072	0.075	0.087	0.12	0.22	0.28	0.30	0.35	0.39
水泥稳定碎石	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
级配碎石	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
土基	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

不同材料温度场热属性参数见表4。

表4 内蒙古寒区温度场分析材料热属性参数
Tab.4 Thermal field analysis of materials in cold region of Inner Mongolia

混合料类型	温度/°C	热传导率/(J/(m/h/°C))	热容量/(J/(kg/°C))	温缩系数/(10 ⁻⁵ /°C)
AC-13, AC-20, AC-25, ATB-25	-30	7 236	831.5	1.6
	-20	6 732	854.0	1.9
	-10	4 320	870.9	2.2
	0	3 600	922.6	2.5
	10	3 960	930.0	2.9
	20	4 212	917.7	2.7
	30	4 788	930.9	2.5
	40	5 400	984.3	2.3
水泥稳定碎石	50	6 120	961.5	2
	-	5 616	811.7	1.0
级配碎石	-	4 680	810.9	1.0
土基	-	5 616	1 040.0	50

2 大温差下路面温度应力

大温差是寒区显著的气候特征,根据调查走访结果,漫长寒冷冬季会有一些的天数日温差大于 20℃,甚至接近 40℃。因此,开展日温差为 20,30,40℃下不同路面结构温度应力变化的分析。

2.1 低温路面温度应力

由于水泥稳定碎石层层底温度应力为压应力,不再提取该层温度应力,将路表、沥青层底和水泥稳定碎石层顶计算结果绘制时程曲线如图 1。

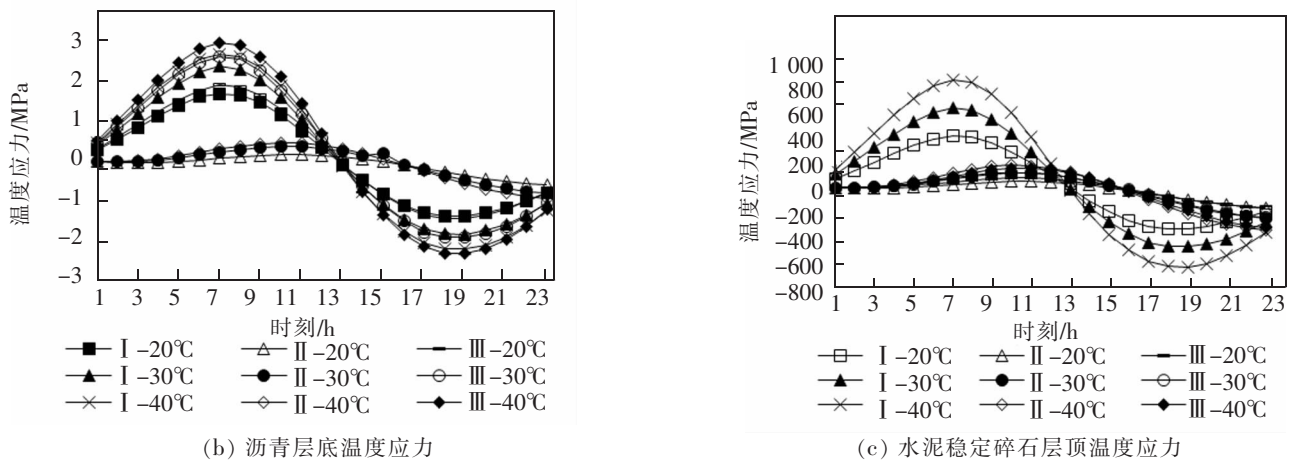


图 1 大温差下低温路面温度应力时程曲线

Fig.1 Temperature stress time-history curve of low temperature pavement under large temperature difference

由图 1 可知,日温差的变化对不同结构类型的路表温度应力影响较小;日温差的提升会使得结构的沥青层底和水泥稳定碎石层顶拉应力增大,但不同结构类型应力增加量和增加速率不同。将各结构不同日温差下的最大温度应力汇总见表 5。

表 5 不同温差 3 种结构各层低温最大拉应力

Tab.5 Maximum tensile stress at low temperature in each layer of three structures with different temperature difference kPa

层位编号	结构 I			结构 II			结构 III		
	20℃	30℃	40℃	20℃	30℃	40℃	20℃	30℃	40℃
1	2 200.43	2 929.1	3 776.82	2 164.2	2 841.26	3 699.4	2 210.76	2 963.38	3 832.89
2	1 685.49	2 336.81	2 647.07	95.24	121.90	136.59	1 873.21	2 588.08	2 928.91
3	396.28	611.96	834.51	41.31	61.88	78.67	64.06	101.92	141.11

(注:层位编号 1 代表路表,2 代表沥青层底,3 代表水泥稳定碎石层顶。)

分析表 5,3 种结构路表温度应力差距不大,日温差增加 10℃,路表温度应力增加 30%~35%,但总体呈现结构 III>结构 I>结构 II,这是因为结构 II 上基层为沥青稳定碎石,沥青层较厚,而沥青混合料热容量较

高,路面则表现为保温性能较好,路表温度变化相应减小,结构Ⅲ虽然沥青层厚度和结构Ⅰ相同但如上节分析级配碎石由于本身热容量和模量较小使得路表拉应力增加。

3种结构的沥青层底和水泥稳定碎石层顶拉应力差别较大,各结构日温差每上升10℃温度应力的变化幅度如表6。

表6 不同温差3种结构各层低温拉应力变化幅度

Tab.6 Variation amplitude of low-temperature tensile stress in each layer of three structures with different temperature difference

温差值/℃	结构Ⅰ		结构Ⅱ		结构Ⅲ	
	2层	3层	2层	3层	2层	3层
	20~30	38.64	54.43	27.99	49.79	38.16
30~40	18.41	56.16	15.42	40.64	18.19	61.18

组合式基层结构(结构Ⅱ)沥青层底和水泥稳定碎石层顶温度应力在变化幅度上最小;半刚性基层结构(结构Ⅰ)与倒装式基层结构(结构Ⅲ)相比,在沥青层底,结构Ⅲ变化较小,而在水泥稳定碎石层顶结构Ⅰ变化较小。说明在大温差条件下,组合式基层路面对低温作用的适应性最好,半刚性基层和倒装式基层路面则互有优劣。

2.2 高温路面温度应力

不同日温差下高温季节路面温度应力时程曲线变化规律与低温基本相同,故仅提取3种结构各层的最大拉应力汇总如表7。特别地,由于水泥稳定碎石层底温度应力为压应力便不再统计。

表7 不同温差3种结构各层高温最大拉应力

Tab.7 Maximum tensile stress at high temperature in each layer of three structures with different temperature difference

层位编号	结构Ⅰ			结构Ⅱ			结构Ⅲ		
	20℃	30℃	40℃	20℃	30℃	40℃	20℃	30℃	40℃
	1	741.48	1 645.8	3 325.19	739.29	1 645.8	3 325.19	754.55	1 645.85
2	476.93	867.12	1663.61	16.28	28.79	51.68	523.89	876.73	1704
3	472.27	578.3	686.41	13.69	16.58	19.63	84.56	101.93	150.69

(注:层位编号1代表路表,2代表沥青层底,3代表水泥稳定碎石层顶。)

从表7可以看出,同低温环境,高温下相同日温差的路表拉应力3种结构基本相同。日温差每增大10℃,路表拉应力增加102%~121%,增加幅度比低温环境更高,说明在内蒙古寒冷地区夏季突然降温时节也可能引起沥青面层的开裂。

表8 不同温差3种结构各层高温拉应力变化幅度

Tab.8 The variation of high temperature tensile stress in each layer of three structures with different temperature difference

温差值/℃	结构Ⅰ		结构Ⅱ		结构Ⅲ	
	2层	3层	2层	3层	2层	3层
	20~30	81.81	22.45	76.84	21.11	67.35
30~40	91.85	18.69	79.51	18.40	94.36	47.84

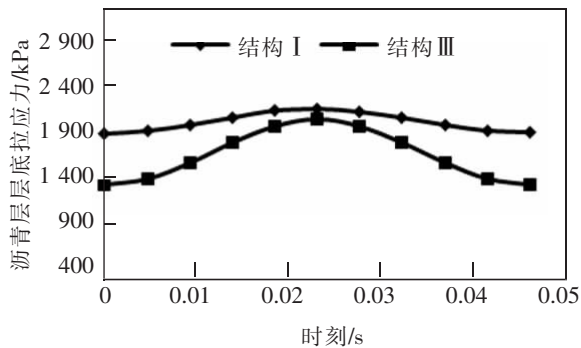
由表7和表8,随着温差的增加,3种结构的温度应力均有增加,其中结构Ⅱ增加幅度最小,结构Ⅰ和结构Ⅲ则互有优劣且差距不大。

3 温度和动载联合作用下力学响应对比

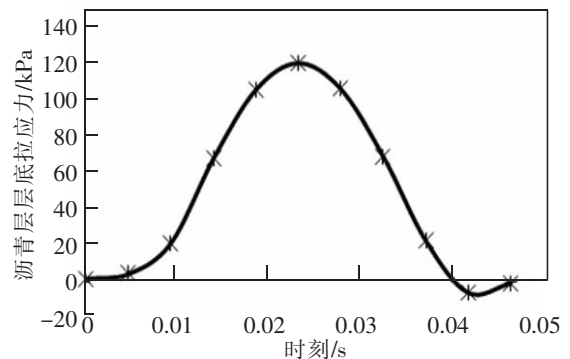
为了更全面、真实地了解路面的力学响应状态,有必要开展温度与荷载耦合作用下的路面结构力学分析。研究3种路面结构在温度和动荷载联合作用下的路面力学响应,温度场及温度应力场与动荷载应力场时间变化节点长度差距较大,温度场与温度应力场时间节点远远大于动荷载应力场,基于此考虑温度作用与动荷载作用最不利组合的情况,即假设在温度应力产生的这一时间域内动荷载持续作用,采用顺序耦合法(荷载传递法)对结构 I、结构 II、结构 III 先做热分析,然后将热分析结果作为结构荷载添加进动荷载的有限元计算模型中,温度场和温度应力场会对动态荷载的力学响应产生影响,从而完成温度与动荷载耦合作用下路面力学响应的仿真模拟。为此,构造温度和动载的耦合作用分析模型,其中动荷载采用 Imad L. AL-Qadi 提出的正弦荷载模型,荷载最大强度取 0.7 MPa,车速取 100 km/h。

3.1 低温与动载耦合作用对比分析

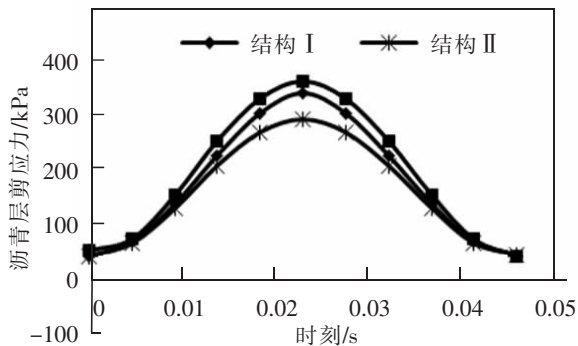
选取冬季典型气候的 06:00 作为路面低温作用的最不利情况,借助 Abaqus 分析平台,获取 3 种路面结构类型的力学指标时程曲线如图 2。



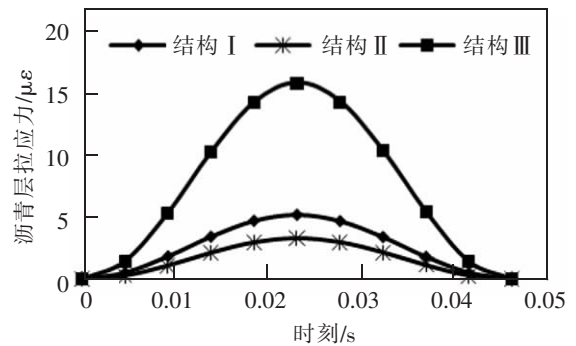
(a) 结构 I、III 沥青层底拉应力的变化



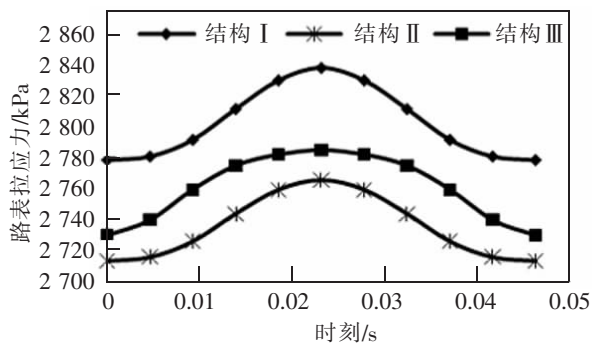
(b) 结构 II 沥青层底拉应力的变化



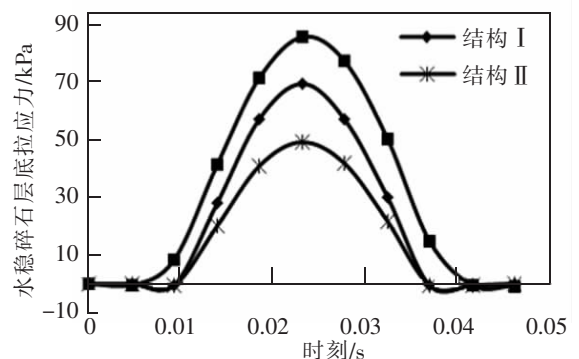
(c) 沥青层剪应力的变化



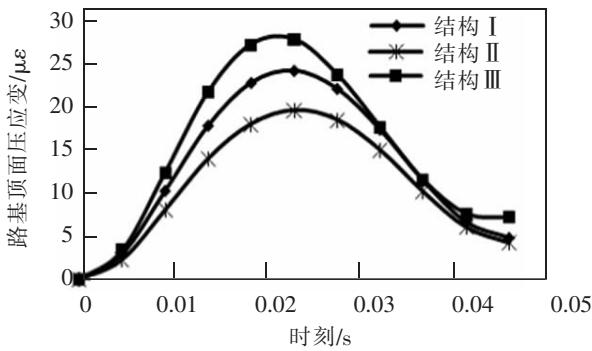
(d) 沥青层底拉应变的变化



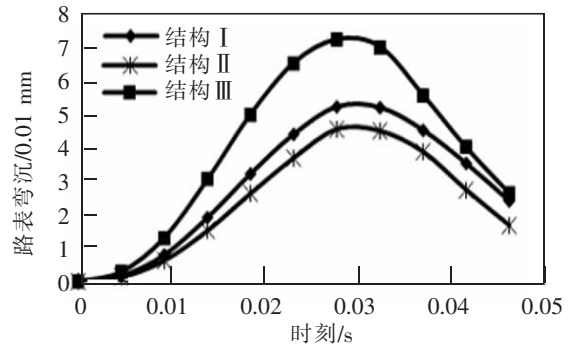
(e) 路表拉应力的变化



(f) 水泥稳定碎石层底拉应力的变化



(g) 路基顶面压应变的变化



(h) 路表弯沉的变化

图 2 低温时节动载下路面力学指标时程曲线

Fig.2 Time history curve of pavement mechanics index under dynamic load at low temperature

分析图 2,将各结构在冬季低温和动载联合作用的力学指标峰值排序可知,相比半刚性基层和倒装式基层路面,组合式基层路面在所有力学指标上均有优势;对于倒装式基层路面,其整体在耦合场作用下表现较差,甚至弱于半刚性基层路面,这是由于沥青混合料低温下模量增大,与级配碎石模量比增大,路面结构整体性降低。

3.2 高温与动载耦合作用对比分析

选取夏季典型气候的 14:00 作为路面高温作用的最不利情况,借助 Abaqus 分析平台,获取力学指标时程曲线,因变化规律与低温时相似,仅提取各层最大值,见表 9。由于夏季高温期路面面层产生较大温度应力以压应力为主,沥青层处于受压状态,且沥青材料的受拉状态一般亦不是高温下的研究对象,故不再对沥青层拉应力和路表拉应力作统计。

表 9 高温时节动载下路面各层力学指标最大值

Tab.9 Maximum mechanical index of each layer of pavement under dynamic load in high temperature

结构	沥青层剪应力/MPa	水稳碎石层底拉应力/kPa	路表弯沉/0.01 mm	路基顶面压应变/με
结构 I	245.35	19.04	20.60	92.15
结构 II	200.46	37.03	21.78	89.23
结构 III	255.24	76.08	30.93	107.93

分析表 9,将各结构在夏季高温和动载联合作用的力学指标峰值排序得知,由于高温下沥青混合料模量的下降,组合式基层路面结构整体强度变弱,结构强度小于半刚性基层路面但仍然好于倒装式基层路面,且在路基顶面压应变、路表弯沉上与半刚性基层路面相差并不大,最大仅小 3%;从高温季节重点考察的沥青层剪应力上看,组合式基层路面结构均较小,在高温季节抗车辙方面有一定优势。

4 结论

在大温差作用下,3 种结构高、低温下各结构层温度应力变化幅度规律相似。对于路表温度应力,变化幅度为半刚性基层路面>倒装式基层路面>组合式基层路面;对于其他层位温度应力,组合式基层路面变化依然最小,半刚性基层和倒装式基层路面则互有优劣。

在温度和动载耦合作用下,低温下组合式基层路面在所有力学指标上均较小,而高温下组合式基层路面强度虽有降低,但最大仅小 3%,从高温季节重点考察的沥青层剪应力及级配碎石层剪应力上看,组合式基层路面结构均较小,在高温季节抗车辙方面有一定优势。

综合来看,组合式基层路面对寒冷区的大温差作用适用最好,且在温度和动载耦合作用下仍然具有优势,故在寒冷地区推荐优先考虑组合式基层路面,当路面较为注重承载能力时,可考虑使用半刚性基层路面结构。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘继忠. 云南省高海拔地区沥青路面温度场及温度应力数值计算分析[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009.
- [3] 艾长发, 黄大强, 余孝丽, 等. 基于季节时温的沥青路面温荷耦合动力性能分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(4):66-73.
- [4] 郝培文, 张兰峰. 基于连续变温的沥青路面温度应力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(2):176-183.
- [5] 王志岗. 甘肃省沥青路面低温温度应力综合分析[D]. 西安:长安大学, 2012.
- [6] 黄大强. 高寒地区沥青路面温度与荷载耦合动力行为[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [7] 艾长发. 高寒地区沥青路面行为特性与设计方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
- [8] 张小宁, 孙立军. 沥青路面面层和基层结构模量的反算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004(10):1386-1389.
- [9] 王月峰, 王传沛, 庄传仪. 沥青混合料动态模量温度修正研究[J]. 中外公路, 2012, 32(2):210-214.
- [10] 商亚鹏. 半刚性基层沥青路面温缩性能试验及温度应力分析[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [11] 付国志, 曹丹丹, 赵延庆, 等. 沥青混合料低温临界开裂温度的确定[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4):1001-1007.
- [12] 张红春. 半刚性基层沥青路面综合抗裂技术研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [13] 郑健龙. 沥青路面设计关键技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2010.

Study on Temperature Stress Behavior of Pavement in Cold Area Under Large Temperature Difference

Guo Chuang¹, Zhou Yubo¹, Deng Zhanwei²

(1. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to understand the change of internal temperature stress of the pavement in the cold region of Inner Mongolia and study the temperature stress behavior and structural performance for different base pavement in the cold region, this paper obtained the temperature stress of pavement in large temperature difference environment with daily temperature difference of 20 °C, 30 °C and 40 °C by using Abaqus software and the sequential coupled-field method. The mechanical response of different base pavement under the coupled effect of dynamic load was analyzed. The results show that the combined base pavement has the best mechanical performance in the cold region with large temperature difference, and still has the advantage under the coupling effect of temperature and dynamic load. The temperature stress of each layer is the minimum, and all mechanical indexes are small under the coupling effect of low temperature and dynamic load, and the shear stress of asphalt layer is better under the coupling effect of high temperature and dynamic load.

Key words: finite element method; large temperature difference; temperature field; temperature stress; coupling effect