

基于动载作用的组合式柔性基层路面典型结构优化设计研究

张宜洛¹, 邓展伟^{1*}, 郭创²

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

摘要:借助 Abaqus 有限元计算平台建立路面三维模型,使用动态模量,施加动态荷载实现路面的动力响应,研究了应对组合式基层路面,根据现有研究成果拟定了与路面损坏相对应的车辙和裂缝类损坏的力学控制指标,通过设计正交试验分析各个力学指标与结构设计参数变化的敏感性,取对结构设计参数敏感性高的力学指标作为主要分析对象,得出了路面破坏模式、力学控制指标以及结构设计参数的显著性对应关系。研究 S1~S4 共 4 种路面结构高、低温与动荷载耦合作用下的路面力学响应,推荐了内蒙古寒区路面结构,并得出路面结构设计的优化设计策略。

关键词:组合式柔性基层;有限单元法;动力分析;正交试验;耦合作用

路面在实际使用中所接受的车辆荷载是随时间不断变化的,以往采用静态参数对路面结构的力学分析,无法反映沥青混合料的黏弹性,而动态模量则反映了沥青混合料的黏弹性性质,动态荷载更加接近路面结构真实的受力状态,因此,基于动态荷载与动态模量对路面进行力学响应分析更加接近路面真实的受力状态,且沥青路面结构组合形式的确定应当结合自然环境因素。寒冷地区冬季低温是其最为明显的环境特点,温度的变化会改变沥青混合料自身的弹性模量,亦会使得路面内部产生温度应力。动载作用和温度作用均会影响路面结构内部的力学响应,因此对于内蒙古寒区的组合式柔性基层路面在动载作用下典型结构优化设计的研究很有必要。

1 用于动力分析的路面结构

为了便于探讨组合式柔性基层路面在动载作用下的动力响应和对动载的适应性,排除结构层厚度和层位对动载作用的影响,该文把内蒙古寒区典型半刚性基层结构(结构 I)的上基层分别替换为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、组合式基层路面的代表型结构,见图 1。

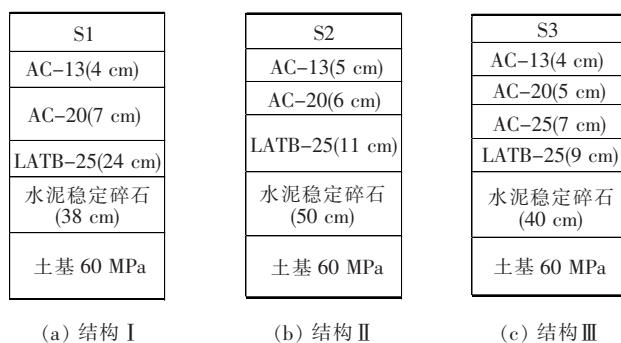


图 1 组合式基层路面结构组合图式

结构 I (S1) 是在沥青稳定碎石中加入煤液化残渣降低造价后,所提出的厚沥青层路面结构。沥青面层厚度为 11 cm,沥青稳定碎石基层厚度为 24 cm,总体沥青层厚度达到 35 cm。

结构 II (S2) 是典型的组合式基层路面结构,沥青面层为 11 cm,沥青稳定碎石基层为 11 cm,沥青层厚度为 22 cm。

结构 III (S3) 也是典型的组合式基层路面结构,沥青面层为 16 cm,沥青稳定碎石基层为 9 cm,沥青层厚度为 25 cm。与 S2 不同的是 S3 增加了沥青层的厚度。

特别地,这里将内蒙古寒区现有典型半刚性基层结构记为 S4。

收稿日期:2019-08-07

作者简介:张宜洛,男,博士,副教授, E-mail: zhangyiluo@163.com

* 通信作者:邓展伟,男,硕士研究生, E-mail: 2510845416@qq.com

以上结构动载作用有限元仿真模拟的材料参数如表 1 所示。

表 1 动态分析材料参数

混合料类型	模量/ MPa	密度/ (kg · m ⁻³)	阻尼比	泊松比
沥青混凝土	11 000	2 400	0.05	0.22
沥青稳定碎石	10 000	2 400	0.05	0.22
水泥稳定碎石	12 000	2 200	0.05	0.20
路基	60(100)	1 800	0.05	0.35

对于各接触面间的摩擦系数,根据肖川对路面结构分析的研究,即不同材料层间假设为不连续并将摩擦系数设置为 0.8。

2 沥青路面有限元动力分析方法

对于沥青路面力学响应的分析将采用基于有限元隐式动力分析法,并在三维路面结构模型上加动态荷载,同时材料的参数采用动态模量。

2.1 动力分析的有限元计算三维模型

Abaqus 的计算模型尺寸会对计算结果产生影响,根据王志刚的研究,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。该文经过试算,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,该文计算模型尺寸为: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;温度场分析中,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),通过收集内蒙古寒区气象资料确定环境参数为:冬季寒冷季节取日太阳辐射总量 Q 为 8.57 MJ/m^2 ,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 MJ/m^2 ,实际有效日照时数 c 为 9.80 h ;日平均风速根据在中国气象数据网上查询数据确定为夏季 3.5 m/s 、冬季风速 4.0 m/s ,冬季日小时最低气温 $-23.0\text{ }^\circ\text{C}$,夏季日小时气温最高值为 $31.6\text{ }^\circ\text{C}$;太阳辐射吸收率取 0.90 ,路面发射率为 0.81 ,绝对零度值为 $-273\text{ }^\circ\text{C}$,Stefan-Boltzmann 常数取 2.041×10^{-4} ;温度应力分析时模型的边界条件为: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。路面结构层间由于材料的不同、黏结材料的性能差异以及施工等因素的影响,结构层间状态介于二者之间,有限单元法的使

用能较好地考虑结构层间这种非线性的状态,该文对于层间不连续模型的处理方式具体如下:① 在沥青层和水泥稳定碎石层层间设置接触面,为不完全连续,其他材料的接触为完全连续;② 用摩擦系数 μ 模拟表征层间传递剪切应力的强弱, μ 的取值区间为 $0.2\sim 1.2$;③ 对于完全连续的接触面,采用绑定约束有限单元法的使用能较好地考虑结构层间这种非线性的状态。计算模型如图 2 所示。

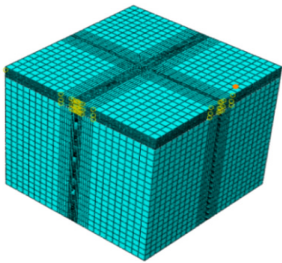


图 2 路面结构有限元分析三维模型

2.2 加载方式

沥青路面在实际使用过程中,车辆的荷载作用是以动态的形式施加于路面上,且 JTG D50—2017《沥青路面设计规范》对于沥青混合料的设计参数使用了动态压缩模量,为此该文对于路面结构力学响应的数值模拟采用动态荷载的加载模式。根据美国 Imad L. AL-Qadi 对路面荷载的实测研究,动态荷载的作用曲线接近正弦曲线,可以用式(1)、(2)表示:

$$\begin{aligned} &[q, \quad v=0 \\ &L(t)=\{q\sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right), \quad v>0,0\leq t\leq T \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &[0, \quad t>T \\ &T=\frac{12R}{v} \end{aligned} \tag{2}$$

式中: $L(t)$ 为 t 时刻荷载值(MPa); q 为荷载峰值(MPa); v 为行车速度(m/s); R 为荷载作用等效圆半径(m); T 为动荷载作用时间(s)。

该文在动态荷载的有限元模拟计算中,标准荷载 q 取 0.7 MPa ,行车速度 v 取内蒙古寒区高速公路常用设计速度 100 km/h ,依据 Imad L. AL-Qadi 提供的模型,计算得出一个周期的荷载加载曲线见图 3。考虑到有限元方法收敛难度和网格划分,该文将车辆与路面之间的接触面简化为对称的双矩形,矩形尺寸为 $0.189\text{ m}\times 0.189\text{ m}$,中心间距为 0.3195 m 。

3 动、静荷载作用下路面力学响应对比

对与路面的力学分析基于动力分析法,并在三维

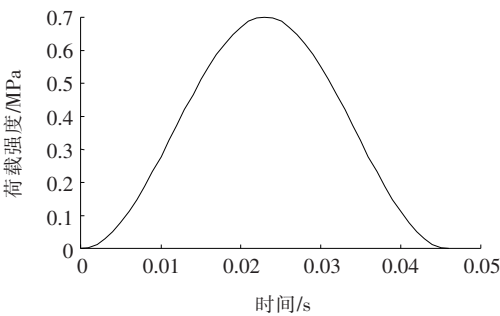


图 3 荷载作用图式

路面结构模型上加动态荷载,同时材料的参数采用动态模量。对材料的动、静模量取值参考肖川和艾长发对动态模量的试验研究,对于沥青混合料动态模量取 20℃、10 Hz 条件下的换算值,具体如表 1(路基模量取括号内数值)、2 所示。

特别地,关于动载下的路面拉应力和拉应变,该文

表 2 静态分析材料参数

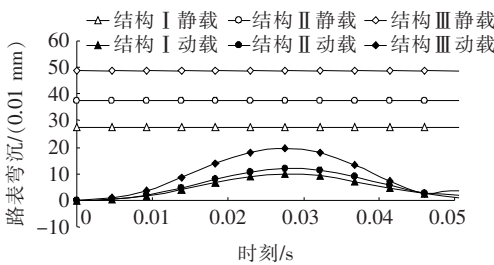
混合料	模量/MPa	泊松比
沥青混凝土	1 800	0.22
沥青稳定碎石	1 400	0.22
水泥稳定碎石	3 500	0.20
路基	50	0.35

采用弯曲劲度模量,根据规范提供的弯曲劲度模量与动态模量转换公式[式(3)]进行两种模量的换算。

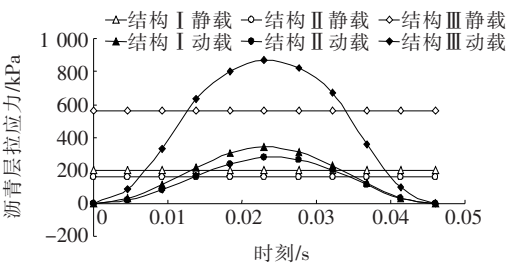
$$S=0.66E^{0.994} \tag{3}$$

式中: S 为弯曲劲度模量(MPa); E 为动态模量(MPa)。

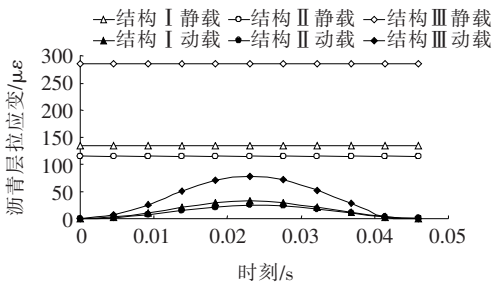
利用 Abaqus 有限元计算平台分别对有限元结构模型施加静荷载和动荷载进行数值模拟分析,荷载强度为 0.7 MPa;并提取路面结构层 6 种力学指标对比分析,力学响应时程曲线见图 4。



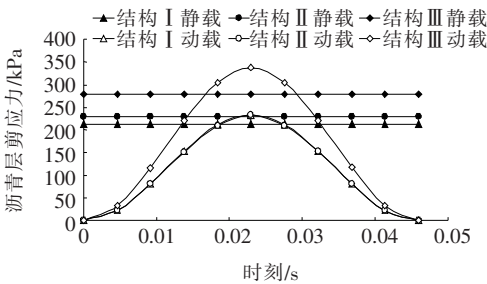
(a) 路表弯沉



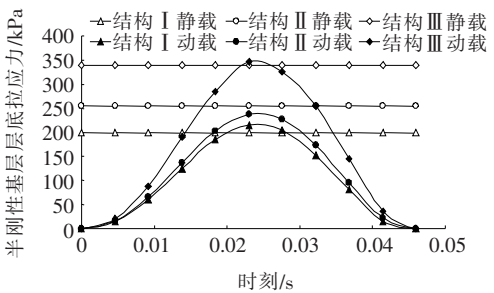
(b) 沥青层拉应力



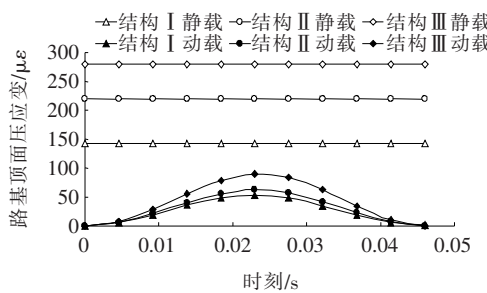
(c) 沥青层拉应变



(d) 沥青层剪应力



(e) 水泥稳定碎石层底拉应力



(f) 路基顶面压应变

图 4 动、静载作用路面力学响应时程曲线对比

由图 4 可知,动荷载作用下的动力响应随时间发生变化,与荷载加载曲线对应,呈现出大致相同的变化

趋势;因动荷载作用存在卸载效应和能量积累,各个力学指标不会在荷载为零时同步降为零。

路面动力响应和静力响应差异明显,尤其变形类力学指标,可相差数倍。由于动力响应本身的卸载效应、能量积累以及动、静结构分析路面材料模量的差异,使得与变形相关的力学指标动载作用均小于静载作用,而与应力相关的指标动载作用均大于静载作用。

4 沥青路面结构力学控制指标敏感性分析

4.1 基于裂缝与车辙的力学控制指标

对内蒙古寒区路面损坏状况和原因的分析,参考国内外大量研究文献,初拟路面结构的破坏类型及其对应力学控制指标如表 3 所示。

4.2 组合式基层路面力学控制指标敏感性分析

正交试验应先对正交表进行设计,包括确定影响因子和试验水平。从结构设计和材料设计出发考虑影响因子为沥青面层厚度、沥青面层模量、ATB 层厚度、

ATB 层模量、水泥稳定碎石层厚度、水泥稳定碎石层模量、路基模量、摩擦系数共 8 个结构设计参数。因子水平的确定应当依据因子取值的上下限等分为相应的水平数,因子水平数通常不少于 3 个。该文选取的影响因子和因素见表 4。

根据表 4 所列的影响因子和各因子的水平,选取 $L_{32}(4^8)$ 正交表进行正交试验设计,可以得到各具体的试验条件和正交试验方案,利用 Abaqus 有限元计算平台对各个试验方案进行动荷载作用下的力学响应仿真模拟,提取需考察的各个力学指标。对正交试验结果采用方差分析法,构造 F 统计量进行 F 检验,以判断各个因子对试验值的影响程度;当 F 值大于相应显著水平下的 F 临界值时,即认为该因子对试验值产生了显著影响,且 F 值越大因子的影响程度越大。基于此,为节省篇幅该文仅列出水泥稳定碎石层底拉应力的 F 值计算结果(表 5),其他指标只列出 F 值,如表 6 所示。

表 3 组合式基层路面结构

损坏类型	力学控制指标
水泥稳定碎石层疲劳破坏	水泥稳定碎石层底弯拉应力
沥青层疲劳破坏	沥青层拉应变/拉应力
结构型车辙	路基顶面竖向位移、路基顶面压应变、路表弯沉、级配碎石顶面竖向位移
剪切型车辙/Top-Down 裂缝	路表拉应力、沥青层剪应力

表 4 组合式基层结构正交分析的因子和水平

水平	沥青面层		ATB 层		水稳层		路基	摩擦
	厚度	模量	厚度	模量	厚度	模量	模量	系数
	h_1/cm	E_1/MPa	h_2/cm	E_2/MPa	h_3/cm	E_3/MPa	E_4/MPa	f
1	10	8 000	10	7 000	20	9 000	40	0.2
2	15	10 000	15	9 000	25	12 000	80	0.5
3	20	12 000	20	11 000	30	15 000	120	0.8
4	25	14 000	25	13 000	35	18 000	160	1.1

表 5 组合式基层水泥稳定碎石层底拉应力 F 值计算结果

因子	离差	自由度	均方离差	F 值	F 临界值		
					$\alpha=0.1$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
h_1	171 075.417	3	57 025.139	20.058	5.39	9.28	29.46
E_1	36 775.119	3	12 258.373	4.312	5.39	9.28	29.46
h_2	130 856.929	3	43 618.976	15.342	5.39	9.28	29.46
E_2	11 910.789	3	3 970.263	1.396	5.39	9.28	29.46
h_3	44 896.987	3	14 965.662	5.264	5.39	9.28	29.46
E_3	49 673.262	3	16 557.754	5.824	5.39	9.28	29.46
E_4	21 994.143	3	7 331.381	2.579	5.39	9.28	29.46
f_1	5 392.984	3	1 797.661	0.632	5.39	9.28	29.46
误差	19 901.144	7	2 843.021	—	—	—	—

表 6 组合式基层结构各个因子 F 值

因子	沥青层 拉应变	沥青层 拉应力	路基顶面 竖向位移	路基顶面 压应变	路表弯沉	路表 拉应力	沥青层 剪应力
h_1	10.129	11.778	5.222	5.764	5.202	0.382	10.432
E_1	2.129	0.827	1.839	1.899	2.253	5.626	13.039
h_2	8.908	9.724	4.133	4.928	3.977	0.193	0.921
E_2	5.498	5.858	1.204	1.028	1.358	0.310	11.212
h_3	7.957	14.181	5.084	4.236	4.891	10.868	7.752
E_3	4.278	6.794	2.038	2.868	2.040	2.345	4.708
E_4	1.997	2.255	8.668	8.001	8.797	0.566	2.182
f	0.811	0.024	0.371	0.536	0.391	0.085	3.161

由表 5 可知:不同显著性水平下对水泥稳定碎石层底拉应力有显著影响的因子不同。当 $\alpha=0.1$ 时,沥青面层厚度 h_1 、ATB 层厚度 h_2 以及水泥稳定碎石基层模量 E_3 均对水泥稳定碎石层底拉应力有显著影响,影响程度排序为: $h_1>h_2>E_3$;当 $\alpha=0.05$ 时,沥青面层厚度 h_1 、ATB 层厚度 h_2 对底基层层底拉应力会产生显著影响,影响程度排序为 $h_1>h_2$;当 $\alpha=0.01$ 时,则没有因子对水泥稳定碎石层底拉应力产生显著影响。

和对表 5 的分析方法相同,将对各个力学指标产生显著影响的因子进行统计并按影响程度大小排序汇总于表 7 中。

表 7 组合式基层结构各个因子影响程度汇总表

力学指标	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$
水稳层底拉应力	$h_1>h_2>E_3$	$h_1>h_2$	—
沥青层拉应变	$h_1>h_2>h_3>E_2$	h_1	—
沥青层拉应力	$h_3>h_1>h_2>E_3>E_2$	$h_3>h_1>h_2$	—
路基顶面竖向位移	E_4	—	—
路基顶面压应变	$E_4>h_1$	—	—
路表弯沉	E_4	—	—
路表拉应力	$h_3>E_1$	h_3	—
沥青层剪应力	$E_1>E_2>h_1>h_3$	$E_1>E_2>h_1>h_3$	—

由表 7 可知,对于组合式基层路面结构,不同的力学指标对应的影响因子不同,且其排序亦有较大差别;各力学指标影响因子的数量随显著水平的减小而降低。

为了使力学指标反映出所有的结构设计参数的变化和全面地映射出路面结构的损坏模式,结合 $\alpha=0.1$ 时的正交分析结果,分析路面损坏模式对应的力学控

制指标,对组合式基层路面结构力学控制指标总结如表 8 所示。

表 8 组合式基层结构力学控制指标及显著影响因子

破坏模式	力学指标	影响因子($\alpha=0.1$)
水泥稳定碎石层疲劳破坏	水泥稳定碎石层底拉应力	$h_1>h_2>E_3$
沥青层疲劳破坏	沥青层拉应变	$h_1>h_2>h_3>E_2$
结构型车辙	沥青层拉应力	$h_3>h_1>h_2>E_3>E_2$
剪切型车辙/Top-Down 裂缝	路表弯沉	E_4
	路基顶面压应变	$E_4>h_1$
	沥青层剪应力	$E_1>E_2>h_1>h_3$
	路表拉应力	$h_3>E_1$

5 温度与动载耦合作用下路面力学响应对比

S1~S4 结构的沥青层厚度不一,温度变化引起的材料模量的变化对路面力学响应有重要影响。因此,研究 S1~S4 在温度和动荷载联合作用下的路面力学响应,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)即先对 S1~S4 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。

5.1 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 S1~S4 路面结构的力学指标时程曲线如图 5 所示。

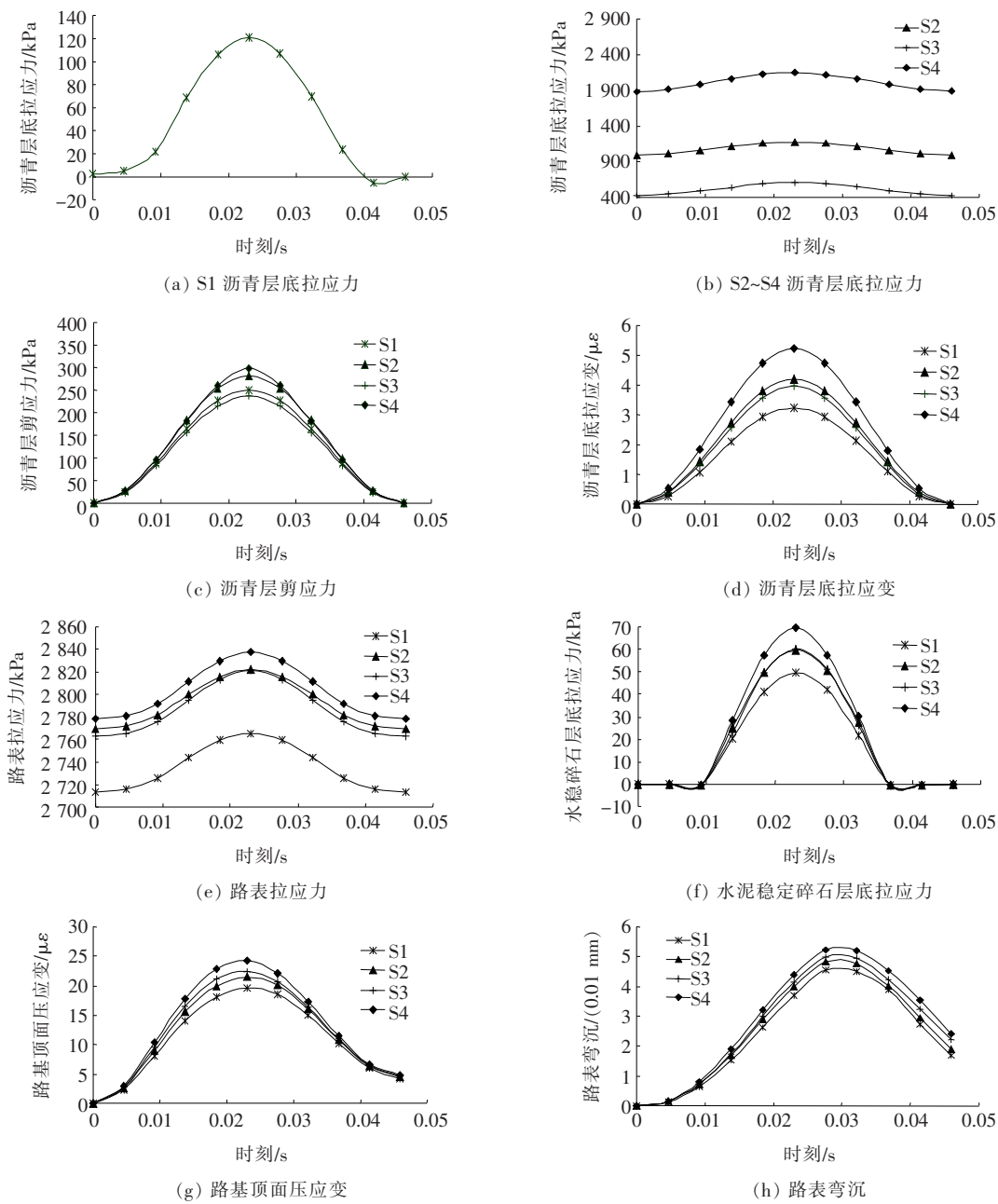


图 5 低温时节动载下路面力学指标时程曲线

分析图 5,将各结构在冬季低温和动载联合作用的力学指标峰值进行排序,结果见表 9。

表 9 低温—动载联合作用路面力学指标排序	
力学指标	力学指标排序
沥青层底拉应力	S4>S2>S3>S1
沥青层剪应力	S4>S2>S1>S3
沥青层底拉应变	S4>S2>S3>S1
路表拉应力	S4>S2>S3>S1
水泥稳定碎石层底拉应力	S4>S3>S2>S1
路基顶面压应变	S4>S3>S2>S1
路表弯沉	S4>S3>S2>S1

由图 5、表 9 可知,组合式基层路面中 S1 结构除沥青层剪应力仅次于 S3 外,其余指标均最小,其次为 S2,S2 保证了路面的整体强度亦在防止路面开裂的指标上处于较好的状态。

5.2 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 S1~S4 的力学指标时程曲线如图 6 所示。特别地,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

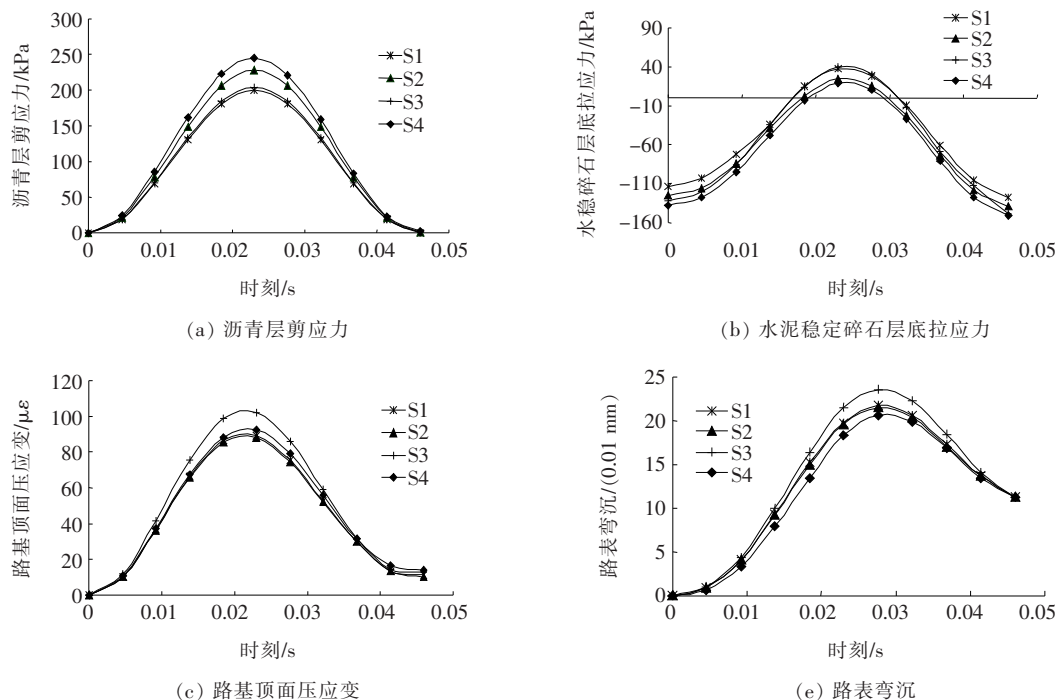


图 6 高温时节动载下路面力学指标时程曲线

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。

分析图 6,将各结构在夏季高温和动载联合作用的力学指标峰值进行排序,结果见表 10。

表 10 高温一动载联合作用路面力学指标排序

力学指标	力学指标排序
沥青层剪应力	S4>S2>S3>S1
水泥稳定碎石层底拉应力	S3>S1>S2>S4
路基顶面压应变	S3>S4>S1>S2
路表弯沉	S3>S1>S2>S4

由图 6、表 10 可知: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,且 S1、S2 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。

6 内蒙古寒区柔性基层路面推荐及优化设计策略

6.1 内蒙古寒区路面结构推荐

对 S1~S4 的动载作用以及温度一动载联合作用

下的力学响应分析如下:

组合式基层路面 S1 采用厚沥青层结构,沥青层拉应力/拉应变表现最好,沥青层剪应力仅次于 S2,其他力学指标均满足使用要求;而 S2 由于水泥稳定碎石层较厚,保留了组合式基层路面的优点且保证了路面结构的整体强度;S3 路面功能与 S1 重复且表现弱于 S1。

低温耦合场作用下,组合式基层路面中 S1 结构除沥青层剪应力仅次于 S3 外,其余指标均最小;其次为 S2, S2 保证了路面的整体强度亦在防止路面开裂的指标上处于较好的状态。高温耦合场下,组合式基层路面 3 种结构中表现最好的为 S1。

综合以上,该文推荐内蒙古寒区应优先使用 S1,在交通量大、重载多的地区可使用 S2,在交通量小、重载较少以及经济受限的路段可尝试 S3。

6.2 内蒙古寒区路面结构优化设计策略

根据沥青路面结构力学指标的敏感性分析,并结合推荐的路面结构设计参数范围及结构设计参数对力学指标的影响规律,选择破坏模式下相对应力学指标的最敏感因素,得出表 11 所示的路面结构设计的优化设计策略。

在进行材料设计参数调整时,除了目标指标,还应当注意参数的变化对其他力学指标的影响。另外,进行结构参数调整时,对于单项力学指标的调整,为使调

表 11 内蒙古寒区沥青路面优化设计策略

推荐结构	损坏模式	力学控制指标	建议调控结构参数	调控效果
S1、S2	水稳层疲劳破坏	水稳层底拉应力	沥青面层厚度	厚度增加,指标减小
	沥青层疲劳破坏	沥青层拉应力	水泥稳定碎石厚度	厚度增加,指标减小
		沥青层拉应变	沥青面层厚度	厚度增加,指标减小
	结构型车辙	路表弯沉	路基模量	模量增加,指标减小
		路基顶面压应变	路基模量	模量增加,指标减小
	剪切型车辙/ Top-Down 裂缝	沥青层剪应力 路表拉应力	ATB 层模量 水泥稳定碎石厚度	模量增加,指标减小 厚度增加,指标增大

控效果可控,建议优先使用单因素调整,当无法满足要求时,可参考表 8,选择次一级调整因素。

另外,给出沥青面层和柔性材料层对温度应力的影响规律,以供参考。即沥青面层厚度增加使路表拉应力有微量减小,沥青层底、水泥稳定碎石层顶拉应力亦发生下降;沥青面层模量增加使路表、沥青层底拉应力增加;沥青稳定碎石厚度的增加,对路表温度应力影响极小,均使水泥稳定碎石层顶拉应力减小,沥青碎石厚度增加使沥青层底拉应力减小;沥青稳定碎石模量增加,沥青层底拉应力减少,而对其他层位拉应力不产生影响。

7 结论

使用有限元方法建立路面三维模型,使用动态模量,施加动态荷载实现路面的动力响应,研究了 S1~S4 高、低温与动荷载联合作用下的路面力学响应,得到以下结论:

- (1) 动、静荷载作用下路面结构各个力学指标差异明显。与变形相关的力学指标动载作用均小于静载作用,而与应力相关的指标动载作用均大于静载作用。因此有必要开展更接近路面实际受力状况的动荷载作用下的路面结构分析与设计。
- (2) 基于路面动力分析设计正交试验,探讨了组合式基层路面力学控制指标的敏感性,对试验结果进行方差分析,得出了路面破坏模式、力学控制指标以及结构设计参数的显著性对应关系。

(3) 研究了 S1~S4 共 4 种路面结构高、低温与动荷载联合作用下的路面力学响应,推荐内蒙古寒区应优先使用 S1,在交通量大、重载多的地区可使用 S2,在交通量小、重载较少以及经济受限的路段可尝试 S3。基于以上研究,推荐了内蒙古寒区路面结构,并提出了对应的优化设计策略。

参考文献:

[1] 张宜洛. 沥青路面施工工艺及质量控制[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[2] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[3] 艾长发. 高寒地区沥青路面行为特性与设计方法研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2008.

[4] 王志岗. 甘肃省沥青路面低温温度应力综合分析[D]. 长安大学硕士学位论文,2012

[5] 肖川. 典型沥青路面动力行为及其结构组合优化研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2014.

[6] 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).

[7] 张宜洛,陈阳阳,李晨,等. 干法掺入煤液化残渣沥青稳定碎石基层材料性能[J]. 重庆交通大学学报,2018(11).

[8] 许志鸿,丰晓,高英,等. 沥青混合料动态性能影响因素的研究[J]. 建筑材料学报,2001(3).

[9] 苗禄伟,周正峰,孙超等. 沥青路面动力响应影响因素有限元分析[J]. 中外公路,2016(5).

[10] 高晓伟,颜薇,宋琿,等. 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[J]. 中外公路,2019(1).