

基于性能的高模量沥青路面结构力学响应

张 玲¹, 耿 娟², 司飞展³

(1. 西安众力沥青有限公司, 西安 710075; 2. 西安公路勘察设计院有限公司, 西安 710065;
3. 西安市公路工程管理处, 西安 710065)

摘要:为探究高模量沥青混凝土长寿命沥青路面应用,研究了高模量沥青混合料的动态模量和抗剪强度。结果表明,高模量沥青混合料的强度具有较强时-温依赖性,抵抗变频加载能力较强;其内摩擦角比传统 AC(沥青混凝土)沥青混合料小 21%,黏聚力高 3 倍。采用有限元分析 7 种不同高模量沥青路面结构的力学响应,针对优选的 4 种路面结构分析厚度对路面力学响应的影响。进而利用车辙预估模型,以车辙深度为控制指标,预测高模量沥青路面的功能寿命。结果显示,不同力学指标对应的较优路面结构均为上中下面层、中下面层采用高模量沥青混合料的结构,其与传统 AC 结构相比可分别延长路面寿命 326%和 118%。

关键词:高模量沥青路面;结构力学响应;功能寿命;动态模量;单轴贯入;车辙预估模型

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671—1807(2023)19—0239—09

随着经济和社会的快速发展,中国交通环境呈现出交通量大、轴载重等特点,对沥青路面结构和材料带来严峻挑战的同时亦提出了更高的要求^[1-6]。近年,长寿命沥青路面逐渐成为各国研究热点,高模量沥青混合料是长寿命或永久路面设计的组成部分^[7-9]。

20 世纪 70 年代末,法国首先发明使用了高模量沥青混合料,一般应用于沥青面层或基层,通过提高面层弹性模量加强路面抵抗荷载变形的能力,根据法国高模量沥青混合料技术标准 NF P 98-140,高模量沥青混合料采用硬质沥青生产^[10-11],其性能要求在 15℃、10 Hz 条件下动态模量 $\geq 14\ 000$ MPa, 10℃、25 Hz、130 $\mu\epsilon$ 下达到 100 万次疲劳寿命。我国现阶段对高模量沥青混合料的定义是以法国 EME(指特定的混合料类型)为基础,中国公路学会发布的《公路高模量沥青路面施工技术指南》(T/CHT S 10004—2018)要求高模量沥青混合料 20℃、10 Hz 动态模量不小于 15 000 MPa 或 45℃、10 Hz 动态模量不小于 4 000 MPa,15℃、10 Hz、控制应变 230 $\mu\epsilon$ 条件下疲劳寿命不小于 100 万次的沥青混合料。

高模量沥青混合料可以提高路面抗车辙性能,延长道路服役时间,节约后期养护成本^[12]。刘朝晖

等^[13]通过配合比优化设计和微观形貌观测,揭露了玄武岩纤维高模量沥青混合料的复合增强机理。Arnold 等^[14]开展的高模量沥青混合料抗车辙性能较其他混合料高出 100 倍,均显示出高模量沥青混合料用于长寿命沥青路面的优势。另外,道路面层结构是病害高发部位^[15-16]。Capitao 和 Picado-Santos^[17]基于高模量沥青混合料长期性能观测的结果,提出了高模量沥青混合料的永久变形参数;Guyot^[18]认为将高模量沥青混合料应用于道路、机场、港口等路面,可以改善路面结构特性、节约成本、降低能耗;Carbonneau 等^[19]通过计算得出高模量沥青混合料的应用可以减小路面厚度;徐希忠等^[20]则推荐了高模量沥青混合料在全厚式沥青路面结构中的合理层位。

综上,高模量沥青混合料的应用可有效延长道路使用寿命。欧美国家针对高模量沥青混合料在长寿命沥青路面的应用研究处于领先地位,国内路面结构形式区别于国外,以半刚性基层为主,针对高模量沥青混合料在国内传统路面结构形式下的应用较少,大规模应用缺乏理论支撑,故有必要基于传统路面结构高模量沥青混合料的性能进行力学响应分析。利用 ABAQUS 建立传统路面结构模型,分析不同路面结构下高模量沥青路面的力学响

收稿日期:2023-06-08

基金项目:陕西省交通运输厅课题项目(20-46K)。

作者简介:张玲(1985—),女,湖南长沙人,西安众力沥青有限公司,技术总监,高级工程师,硕士,研究方向为道路工程材料和技术;耿娟(1971—),女,陕西西安人,西安公路勘察设计院有限公司,高级工程师,研究方向为沥青路面再生技术应用;司飞展(1981—),男,陕西西安人,西安市公路工程管理处,高级工程师,硕士,研究方向为公路工程。

应,及面层厚度对路面力学响应的影响,预测高模量沥青路面的功能寿命,以期为实体工程提供指导,为提高路面结构使用性能及延长使用寿命奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 路面结构和材料

1.1.1 路面结构

高模量沥青混合料可应用于路面的上、中、下面层及上基层^[21]。为更全面了解高模量混合料应用于不同层位时,路面的力学响应和寿命差异,对表 1 所示几种沥青面层结构组合进行分析。

1.1.2 路面材料

拟定的 7 种路面结构中包含 6 种沥青混合料:BBME-13、EME-16、EME-20、AC-13、AC-20、ATB-30。其中,BBME-13、EME-16、EME-20 采用高模量天然沥青 HMB-W 为结合料,性能指标见表 2,AC-13、AC-20 采用 SBS I-C 改性沥青为结合料,ATB-30 采用 70 号基质沥青为结合料,其性能指标均满足规范要求。

根据级配要求,确定用于各面层的级配曲线,如图 1 所示,同面层使用的高模量沥青混合料的级配相比于传统 AC 沥青混合料更细。

1.2 试验及分析方法

1.2.1 试验方法

利用万能试验机(universal testing machine, UTM),在 0.1、0.5、1.5、10、25 Hz 下按 4 个温度(15、20、30、45 ℃)分别对 BBME-13、EME-16、EME-20 高模量沥青混合料试件进行动态模量试验。并对上述 6 种混合料分别进行单轴贯入试验和无侧限抗压试验,读取加载过程中的荷载峰值,计算各沥青混合料的高温抗剪强度和高温抗压强度。

1.2.2 分析方法

基于车辙预估模型,通过控制路面结构车辙深度提出沥青混合料明确的抗剪标准^[21-23]。简化后半刚性基层的车辙预估模型为

$$d_r = \psi(h_1, h_2, E_2) \times 3.4048 \times 10^{-3} T^{1.3109} \times (V^{-1.2375} N)^{0.3050} [\tau]^{-0.5367} \quad (1)$$

$$\psi = (0.4930 h_1^{-0.0029} - 296.5781 h_2^{-1.3196}) E_2^{0.1026} \quad (2)$$

式中: d_r 为车辙深度; ψ 为结构系数; h_1 为沥青层厚度,mm; h_2 为基层厚度,mm; E_2 为基层模量,MPa; T 为第 i 亚层平均温度,℃; V 为载重车平均行车速度,km/h; N 为设计车道设计轴载累计作用次数,次; $[\tau]_i$ 为沥青混合料抗剪强度。

表 1 几种高模量沥青面层结构组合

层位	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4	结构 5	结构 6	对比结构
上面层	BBME-13	BBME-13	BBME-13	AC-13	AC-13	AC-13	AC-13
中面层	EME-16	AC-20	EME-16	EME-16	EME-16	AC-20	AC-20
下面层	EME-20	ATB-30	ATB-30	EME-20	ATB-30	EME-20	ATB-30
基层	36 cm 水泥稳定碎石						
底基层	18 cm 水泥稳定碎石						

表 2 高模量天然沥青 HMB-W 技术指标

试验项目		技术要求	实测值	试验方法
密度(25 ℃)/(g·cm ⁻³)		实测	1.209	T0603
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/0.1 mm		20~35	28	T0604
软化点/℃		≥60	76	T0606
延度(25 ℃,5 cm/min)/cm		≥25	59	T0605
175 ℃表观黏度/(Pa·s)		≤3.0	0.8	T0620
闪点(COC)/℃		≥260	284	T0611
弹性恢复(25 ℃)/%		≥60	76	T0662
贮存稳定性离析,48 h 软化点差/℃		≤2.5	0.6	T0604
灰分/%		≤25	20	T0604
无机物 粒径	$D_{av}/\mu\text{m}$	≤5	3.808	T0604
	$D_{90}/\mu\text{m}$	≤12	8.525	T0604
TFOT 后 残留物	质量损失/%	≤±0.5	-0.2	T0609
	针入度比 25 ℃/%	≥65	70	T0609、 T0604
	延度(25 ℃, 5 cm/min)/cm	≥10	21	T0609、 T0605

1.2.3 数值模型

建立的路面结构有限元模型如图 2 所示,荷载为标准荷载,接地压强为 0.7 MPa,荷载接地面积为 0.186 m×0.192 m,两轮间隙为 0.314 m。模型尺寸为 10 m×10 m×15 m,其中,Z 方向是行车方向(10 m),X 方向是横断面方向(10 m),Y 方向是深度方向(15 m)。采用静态模型,边界条件为:X 和 Z 方向限制法向位移,Y 方向完全固定。沿深度方向,沥青层按 1 cm 进行网格划分,基层按 3 cm 进行网络划分,土基网格划分沿深度方向逐渐变疏,共划分 15 个网格。为提高计算效率,荷载区域网格划分较密,远离荷载区域网格划分逐渐变疏。为简化计算,基层和底基层统一称无机结合料稳定层。

选取无机结合料稳定层内部的最大拉应力、沥

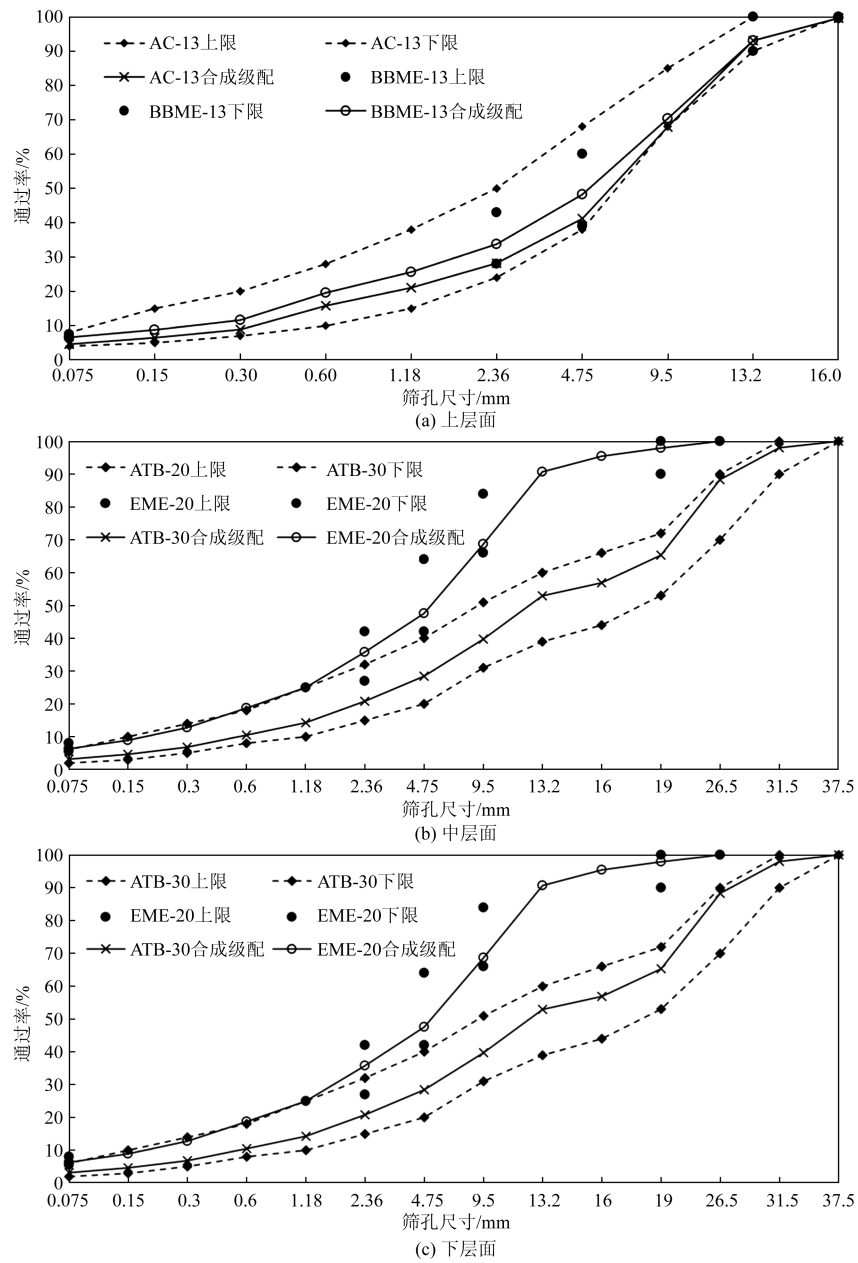


图 1 各面层的混合料级配曲线

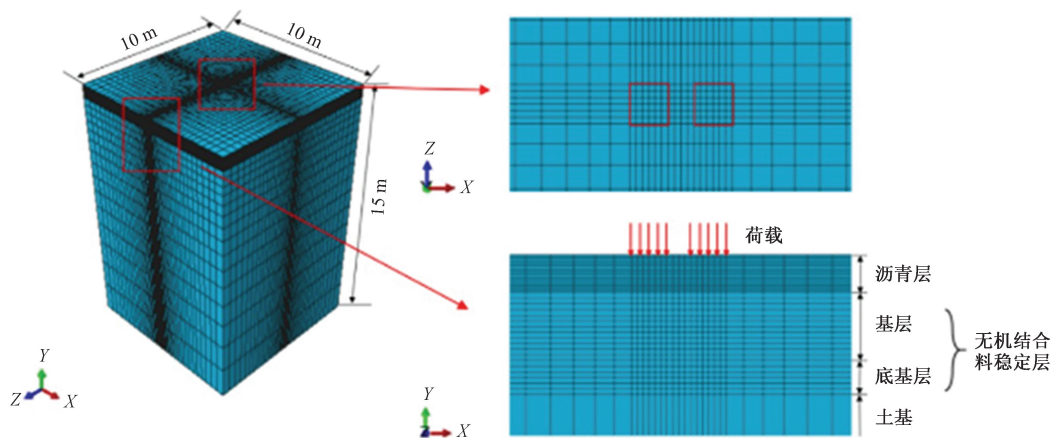


图 2 有限元模型

青层最大剪应力和路表弯沉为力学指标。不同的模量取值对力学响应计算结果影响较大。为更好地表征沥青路面内部的受力状况,在计算不同的力学指标时,模量的选取有所不同。

计算沥青层最大剪应力及弯沉时,根据动态模量主曲线确定的各结构类型沥青层模量见表 3。计算无机结合料稳定层最大拉应力时,参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),各结构层模量取值如表 4 所示。在进行力学响应计算时,温度取 20 ℃,频率取 10 Hz。

2 高模量沥青路面性能分析

2.1 动态模量及主曲线

不同温度下高模量沥青混合料的动态模量和相位角结果如图 3 所示。3 种高模量沥青混合料的动态模量(20 ℃,10 Hz)均超过 15 000 MPa。

由图 3 可知,3 种高模量沥青混合料的动态模

量随着温度的升高均呈现下降的趋势,相位角随温度的升高呈上升趋势。这是由于高温条件下沥青胶结料在荷载作用下的变形呈现感温性,其行为响应接近黏性,说明高模量沥青混合料在高温下变形不可恢复的部分较大,易产生永久变形。但高温下的动态模量和相位角仍然具有优势。

根据 3 种高模量沥青混合料动态模量、相位角结果,采用西格摩德(Sigmoidal)函数对高模量沥青混合料的动态模量主曲线进行拟合^[24]。选取参考温度 20 ℃,将 3 种高模量沥青混合料的动态模量值代入进行拟合,拟合结果见表 5,动态模量主曲线如图 4 所示。

图 4 显示出 3 种高模量沥青混合料的动态模量主曲线基本接近,侧面反映了高模量沥青混合料骨料粒径大小对其强度影响较小。但在全频区域,尤其较低频和较高频时 EME-20 表现出更高的动态模量,表明其抵抗变频加载能力较强。

表 3 各面层各结构类型沥青层模量

面层	沥青层模量/MPa						
	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4	结构 5	结构 6	对比结构
上面层	4 626	4 661	4 632	1 676	1 677	1 680	1 681
中面层	7 253	3 422	7 271	7 277	7 303	3 425	3 431
下面层	12 180	7 657	7 661	12 185	7 664	12 197	7 658

表 4 各结构层模量取值

结构层	材料类型	规范推荐取值/MPa	模量取值/MPa	模量获取方式	泊松比
面层	AC-13	8 500~12 500	11 000	参考规范取中值	0.25
	AC-20	9 000~13 500	12 000	参考规范取中值	0.25
	ATB-25	7 000~11 000	9 000	参考规范取中值	0.25
	BBME-13	—	16 262	实测	0.25
	EME-16	—	17 956	实测	0.25
	EME-20	—	18 109	实测	0.25
基层	水泥稳定碎石	18 000~28 000	12 000	参考规范取中值	0.25
底基层	水泥稳定碎石	14 000~20 000	9000	参考规范取中值	0.25
土基			60	设计文件	0.4

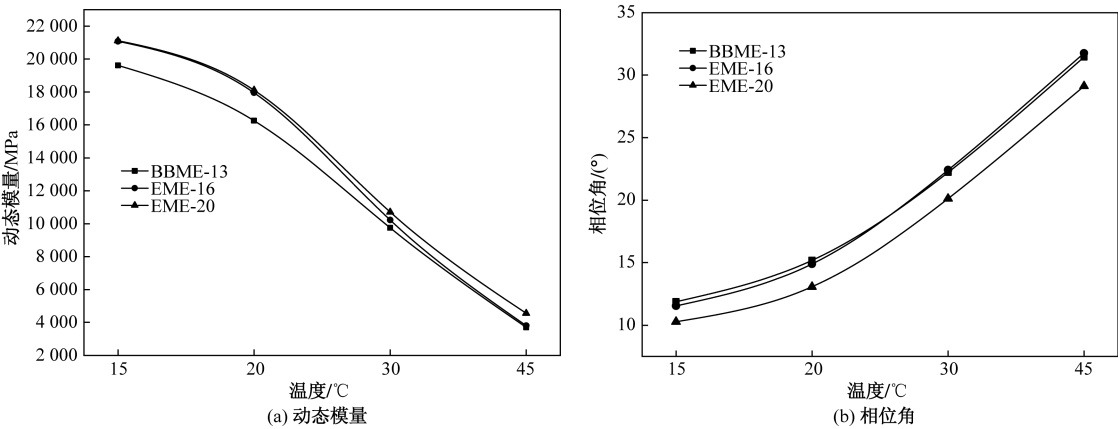


图 3 10 Hz 下 3 种高模量混合料动态模量及相位角

表 5 3 种高模量沥青混合料的动态模量主曲线拟合结果

混合料类型	动态模量主曲线表达式	拟合的误差平方和 SSE
BBME-13	$\lg E = 2.92 + \frac{2.05}{1 + e^{-0.5307 - 0.5536 \left[\lg f + \frac{169400}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{20+273.15} \right) \right]}}$	0.068
EME-16	$\lg E = 2.07 + \frac{3.13}{1 + e^{-0.3485 - 0.4631 \left[\lg f + \frac{169400}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{20+273.15} \right) \right]}}$	0.035
EME-20	$\lg E = 2.03 + \frac{3.37}{1 + e^{-0.2254 - 0.4100 \left[\lg f + \frac{169400}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{20+273.15} \right) \right]}}$	0.071

注: E 为动态模量, MPa; f 为频率, Hz; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; SSE 为误差平方和, 越接近于 0, 拟合越好, 数据预测越成功。

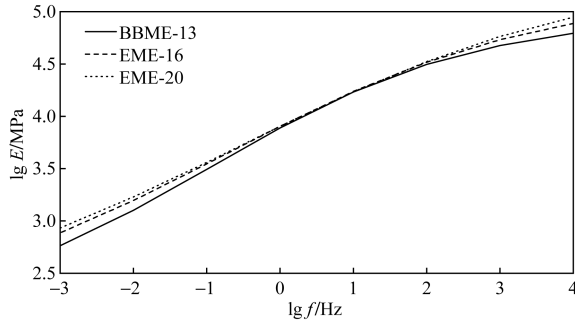


图 4 3 种高模量沥青混合料动态模量主曲线

2.2 抗剪强度

基于单轴贯入强度和无侧限强度试验结果,采用有限元方法,通过摩尔-库仑坐标系计算各沥青混合料的内摩擦角 ψ 和黏聚力 c [25-26]。结果如图 5 所示。

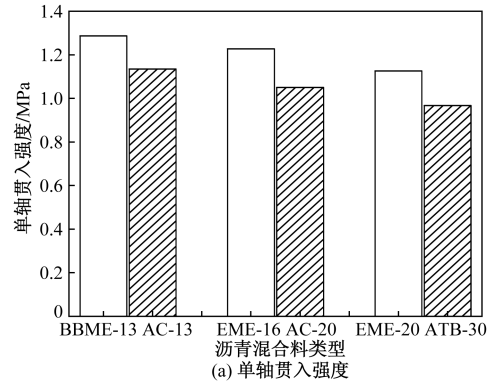
由图 5 可知,相比于传统 AC 沥青混合料,高模量沥青混合料单轴贯入强度和无侧限抗压强度均更高,其中抗压强度提升了 2.2~2.5 倍。说明高模量沥青混合料抗剪强度优于传统 AC 沥青混合料。高模量沥青混合料的内摩擦角比 AC 沥青混合料小 21%,但黏聚力比 AC 沥青混合料的高 3 倍。说明高模量沥青混合料的强度更依赖于沥青的黏聚力,这与动态模量的结果一致,因此高模量沥青混合料的结合料对混合料性能影响起关键作用。

3 高模量沥青路面结构力学响应分析

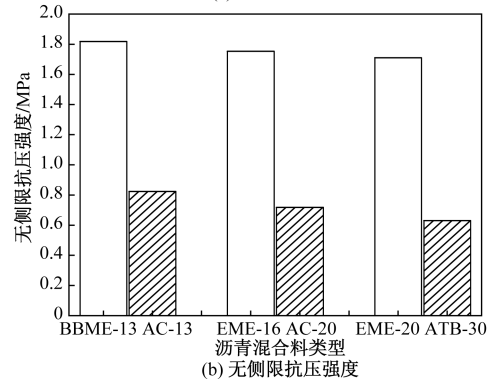
3.1 路面结构对力学响应的影响

沥青层内部剪应力计算结果如图 6 所示,提取的剪应力峰值如图 7 所示,无机结合料稳定层内部拉应力计算结果如图 8 所示,弯沉计算结果如图 9 所示。

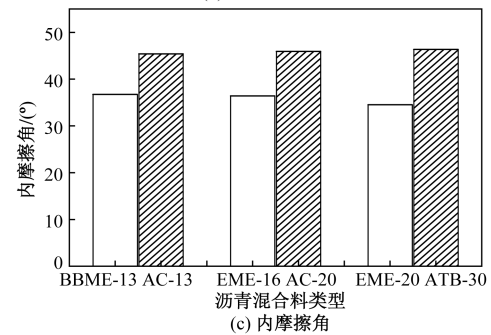
由图 7 可知,除结构 2 外,其他结构的最大剪应力沿深度分布均对比结构要小,说明含有高模量沥青混合料的结构的抗车辙能力优于对比结构。结构 1、结构 3、结构 4 和结构 5 的最大剪应力峰值相差不大,说明在含有高模量沥青混合料的结构中,这 4 种路面结构类型的抗车辙能力更佳。基于最大剪应力峰值,对各结构进行排序:结构 2 > 结构 6 > 对比结构 > 结构 4 > 结构 5 > 结构 3 = 结构 1。但值得注意的是,BBME-13、EME-16 和 EME-20



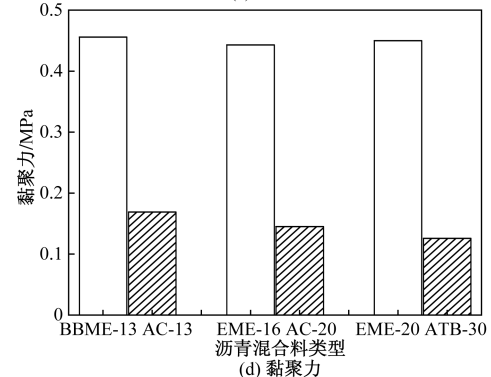
(a) 单轴贯入强度



(b) 无侧限抗压强度



(c) 内摩擦角



(d) 黏聚力

图 5 不同级配沥青混合料的抗剪强度参数

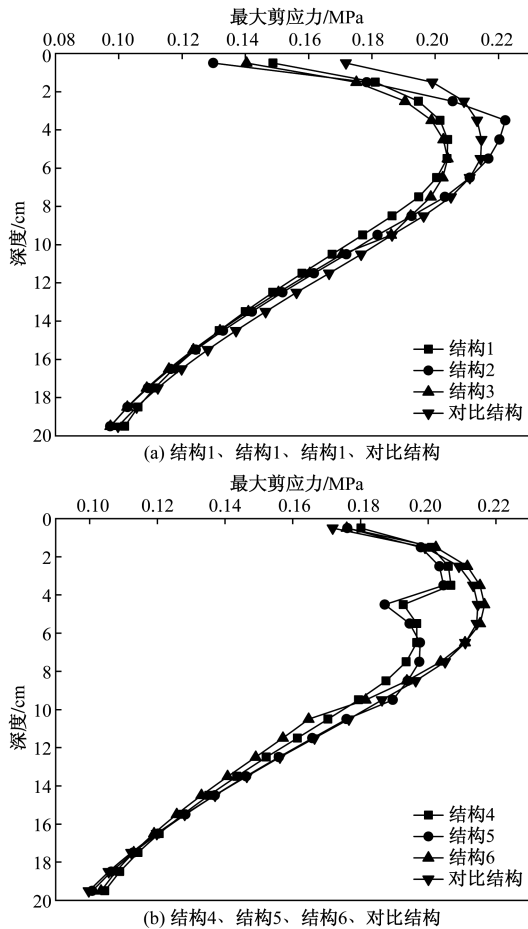


图 6 不同路面结构类型中沥青层最大剪应力沿深度分布

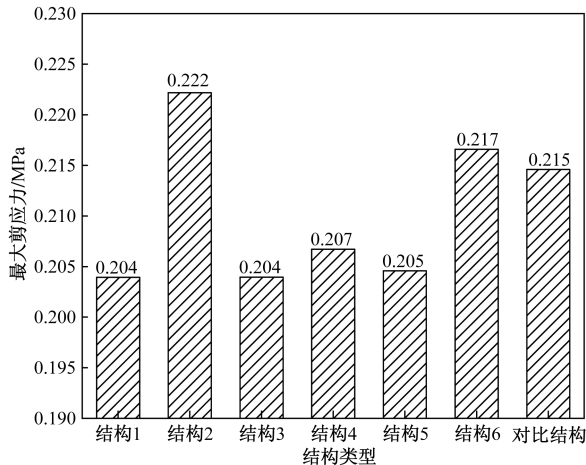


图 7 不同路面结构类型中沥青层最大剪应力峰值对比

的抗剪强度值分别为 1.287、1.227、1.126 MPa, AC-13、AC-20 和 ATB-30 的抗剪强度值分别为 1.135、1.050、0.967 MPa, 而结构 2 和结构 6 沥青层含有高模量沥青混合料, 沥青材料整体的抗力要比对比结构高, 因此综合来说, 对比结构的抗车辙性能最差。由图 8 可知, 无机结合料稳定层内部的纵向应力的值大于横向应力, 纵向应力对裂缝的产生与发

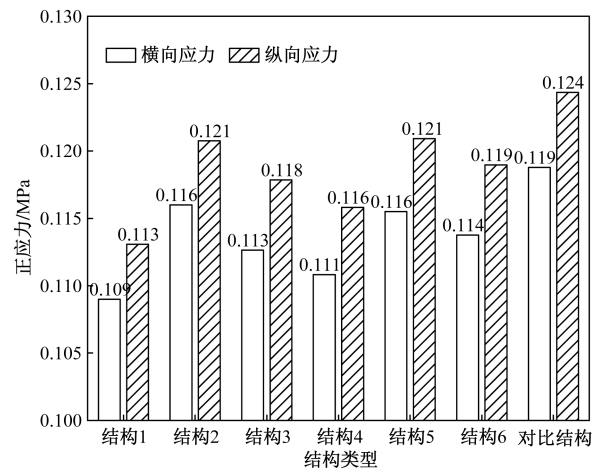


图 8 不同路面结构类型中无机结合料稳定层内部的最大拉应力

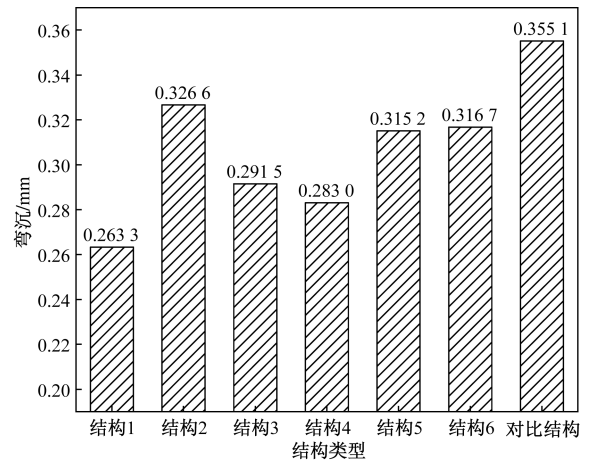


图 9 不同路面结构类型路表弯沉

展起控制作用, 故以纵向应力值对各结构层进行排序: 对比结构 > 结构 2 > 结构 5 > 结构 6 > 结构 3 > 结构 4 > 结构 1。另外, 从半刚性基层抗裂角度, 结构 1 为最优结构。

由图 9 可知, 在其他条件一致的情况下, 上中下全面层天然沥青高模量混合料 (结构 1) 的路表弯沉最小, 其次为中下面层采用天然沥青高模量混合料的结构 4。

将不同指标进行排序汇总见表 6。其中数字越小代表值越小, 即路面寿命越长。具体在进行路面结构类型选择时, 可根据工程的侧重点基于表 6 选择合适的路面结构类型。

3.2 厚度对力学响应的影响

基于上述 3 种不同的力学指标综合考虑, 推荐结构 1、结构 4。考虑结构 5 和对比结构在实体工程中应用较多, 故以结构 1、结构 4、结构 5 和对比结构 4 种不同类型的组合形式进行不同厚度对力学响应的分析。

表 6 各结构、各指标排序

结构层	力学指标	结构 1	结构 2	结构 3	结构 4	结构 5	结构 6	对比结构
沥青层	弯沉-轮隙中心	1	6	3	2	5	4	7
	弯沉-荷载中心	1	6	3	2	4	5	7
	最大剪应力峰值	1	7	2	4	3	6	5
无机结合料稳定层	最大拉应力	1	5	3	2	6	4	7

表 7 厚度组合

沥青层总厚度/cm	15	18	20	24	28	32
厚度组合/cm	4+5+6	4+6+8	4+6+10	4+6+6+8	4+6+8+10	4+6+10+12

选取 15、18、20、24、28、32 cm 6 种不同的路面厚度分析选定结构对各力学指标的影响。各沥青层厚度采用实际工程中常用的路面结构组合,沥青层具体厚度组合见表 7。在计算不同厚度对力学响应的影响时,均取基层和底基层为半刚性基层,厚度分别为 36 cm 和 18 cm。各结构不同力学指标随着沥青层厚度的变化如图 10 所示。

从路面整体受力的角度来看,各力学指标值越小越好。单独分析不同沥青层厚度对 4 种结构力学响应的影响可知,适当增加沥青层厚度可有效控制沥青层内部最大剪应力、基层最大拉应力及路表弯沉,其中路表最大弯沉值降低效果尤其明显。当面层厚度从 15 cm 增加到 32 cm 时,4 种结构的路表弯沉值呈均匀减小的趋势,结构 1、结构 4、结构 5、对比结构分别降低了 20.2%、20.0%、11.5%、9.8%。从最大剪应力峰值的角度考虑,各结构最优沥青层厚度为 15 cm;从基层最大拉应力及弯沉考虑,各结构最优的沥青层厚度均为 32 cm。

图 10 显示,各力学指标之间存在“博弈”现象,在选择沥青层厚度时可考虑各力学指标相交位置附近的沥青层厚度,针对结构 1、结构 4、结构 5 和对比结构,沥青层厚度组合可根据工程所在地具体情况取 18~25 cm。

4 功能寿命预测

当车辙深度分别为 10、15、20 mm 时,可反算得到各结构累计轴载作用次数,见表 8。

以对比结构为基准,不同车辙深度下各结构的寿命如图 11 所示。

目前对于高速公路,车辙深度控制标准为 15 mm。从图 11 可以看出,以 15 mm 车辙深度为控制指标时,相比于对比结构,结构 1 到结构 6 可分别延长路面寿命 326%、49%、258%、118%、93%、10%,结构 1 和结构 3 对于寿命的延长效果最好。

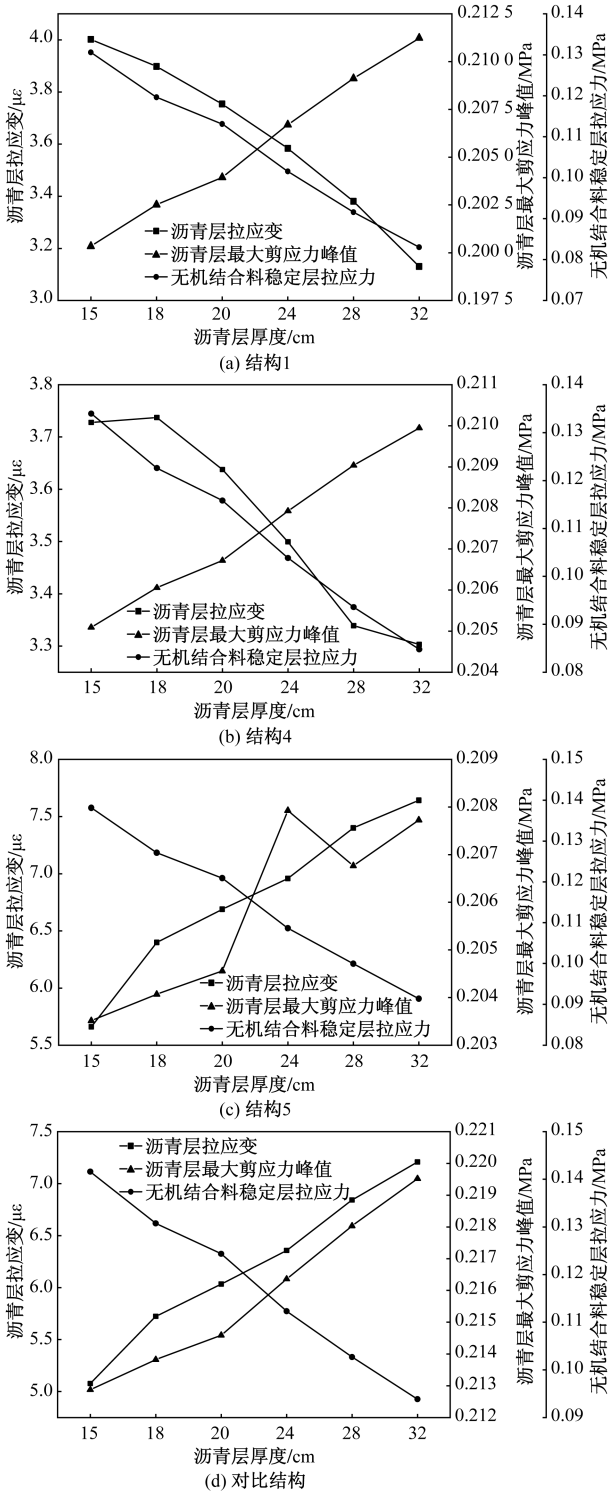


图 10 各结构各力学指标随沥青层厚度的变化规律

表8 各结构不同车辙深度下的累计轴载作用次数

车辙深度/mm	结构1	结构2	结构3	结构4	结构5	结构6	对比结构
10	3.50×10^7	1.36×10^7	2.99×10^7	1.91×10^7	1.70×10^7	1.03×10^7	9.39×10^6
15	1.02×10^8	3.55×10^7	8.57×10^7	5.22×10^7	4.63×10^7	2.63×10^7	2.39×10^7
20	2.17×10^8	6.98×10^7	1.81×10^8	1.07×10^8	9.39×10^7	5.12×10^7	4.66×10^7

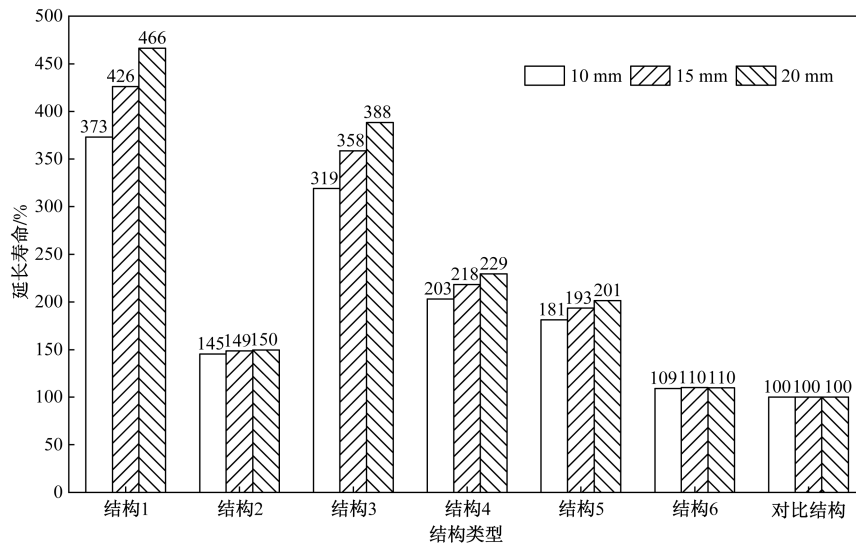


图11 各路面结构不同车辙深度下的延长寿命比较

从表8可知,当设计交通量小于2 000万次(按标准轴载100 kN统计)的时候,采用对比结构可满足要求,当设计交通量大于2 000万次之后,需采用在沥青层中使用高模量沥青混合料才可满足要求。

5 结论

1)高模量沥青混合料的抗剪强度明显优于传统AC沥青混合料,作为典型悬浮-密实结构,沥青的黏聚力对其强度发挥重要作用,沥青结合料的选择尤为关键。

2)基于力学响应计算结果,最优路面结构均为上中下面层均为高模量的结构,其次为上面层和中面层为高模量的结构,以及中下面层为高模量的结构。具体设计时,可根据侧重点选择合适的路面结构,沥青层厚度组合可根据工程所在地具体情况取18~25 cm。

3)基于车辙预估模型,以15 mm车辙深度为控制指标,拟用的路面结构中,上中下全面层、上中面层、中下面层采用高模量沥青混合料对于寿命的延长效果最好,分别可延长路面寿命326%、258%、118%。

参考文献

[1] 高雪池,范剑伟,申全军,等.基于实测轴载谱的沥青路面轴载参数优化与结构寿命预估[J].公路,2022,67(9):

1-8.

- [2] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227.
- [3] 王霖.半刚性基层模式下长寿命路面力学效应的数值模拟分析[D].长春:吉林大学,2021.
- [4] 闫卫红,王伟.相变沥青混合料可行性及性能研究[J].科学技术与工程,2023,23(14):6217-6222.
- [5] 吴正光,王超,沈燕,等.基于实测的高速公路重载交通轴载分析[J].科学技术与工程,2017,17(27):303-308.
- [6] 张萌.基于LSTM神经网络的短期交通量预测研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.
- [7] YANG G, WANG X D. Rationality of applying high-modulus asphalt concrete in long-life asphalt pavement with semi-rigid base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2020, 14(2):16-24.
- [8] GUO L C, XU Q S, ZENG G D, et al. Comparative study on complex modulus and dynamic modulus of high-modulus asphalt mixture[J]. Coatings, 2021, 11(12):1502.
- [9] CHEN Y, WANG H, XU S, et al. High modulus asphalt concrete: a state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 237:1-17.
- [10] 夏全平,高江平,罗浩原,等.用于高模量沥青砼的复合改性硬质沥青低温性能[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(3):541-549.
- [11] 王朝辉,舒诚,韩冰,等.高模量沥青混凝土研究进展[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1):1-15.

- [12] 曹航. 基于抗车辙功能的高模量沥青混凝土路面结构力学分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2018.
- [13] 刘朝晖, 朱国虎, 柳力, 等. 玄武岩纤维与高模量外掺剂复合增强沥青混合料性能[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 2147-2155.
- [14] ARNOLD G, ROGERS D, HALL S, et al. High modulus asphalt to prevent rutting at intersections [C]//17th AAPA International Flexible Pavements Conference. Brisbane, Queensland: AAPA, 2017: 1-10.
- [15] 张明. 基于交通调查和车辙预估的港口道路路面结构优化研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018.
- [16] 王子彬, 罗嘉敏, 牛晓霞. 基于探坑法的路面结构病害测试方法研究[J]. 交通科技, 2018(3): 43-45.
- [17] CAPITÃO S D, PICADO-SANTOS L. Assessing permanent deformation resistance of high modulus asphalt mixtures[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(5): 394-401.
- [18] GUYOT X. Use of high modulus asphalt - “EME”: case studies in the Indian Ocean area[C]//15th AAPA International Flexible Pavements Conference. Brisbane, Queensland: AAPA, 2017: 1-22.
- [19] CARBONNEAU X, MICHAUT J P, ANDERSEN T, et al. High modulus GAB II: a Danish experiment[C]//The 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress: Copenhagen, 2008: 1-7.
- [20] 徐希忠, 韦金城, 张晓萌, 等. 基于力学响应的全厚式高模量沥青路面结构组合及优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4581-4587.
- [21] 毕玉峰, 孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005(8): 1036-1040.
- [22] 罗芳艳, 孙立军. 基于使用性能的沥青路面结构设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2001(S1): 37-40.
- [23] 刘黎萍, 孙立军. 沥青路面结构设计中的寿命周期费用分析[J]. 山东交通学院学报, 2002(2): 53-58.
- [24] 范志宏, 唐光星, 邓宏观, 等. 基于时温等效原理的片麻岩-改性沥青混合料的动态模量主曲线研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 41-46.
- [25] 钱国平, 刘宏富, 郑健龙, 等. 不同受力模式下沥青混合料强度的速度特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 681-687.
- [26] SELIM P, AMIR G, ERTEKIN O, et al. Experimental determination of cohesion and internal friction angle on conventional concretes[J]. Aci Materials Journal, 2017, 114: 407-416.

Structural Mechanics Response of High Modulus Asphalt Pavement Based on Performance

ZHANG Ling¹, GENG Juan², SI Feizhan³

(1. Xi'an Zhongli Asphalt Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Xi'an Highway Survey and Design Research Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Highway Engineering Management Office, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to achieve long-life asphalt pavement and explore the application of high modulus asphalt concrete in long-life asphalt pavement, the dynamic modulus, shear and compressive strength of high modulus asphalt mixture were studied. The results indicate that the strength of high modulus asphalt mixture has a strong time-temperature dependence and strong resistance to variable frequency loading. In addition, the high-temperature shear resistance of high modulus asphalt mixture is better than that of traditional AC(asphalt concrete) asphalt mixture, with an internal friction angle 21% smaller than that of traditional AC asphalt mixture, but a cohesive force three times higher. The mechanical response of seven different high modulus asphalt pavement structures was analyzed using finite element method, and the influence of thickness on the mechanical response of the pavement was analyzed for the four selected pavement structures. Furthermore, the functional life of high modulus asphalt pavement was predicted by rutting prediction model, with rut depth as the control index. The results show that when the structure of high modulus asphalt mixture is used for all surface layers, middle and lower layers, all mechanical indicators reach equilibrium. Compared with traditional AC structures, it can extend the road life by 326% and 118% respectively.

Keywords: high modulus asphalt pavement; structural mechanics response; functional life; dynamic modulus; uniaxial penetration; rut prediction model