

聚烯烃类高模量沥青混合料路用性能的试验研究

王昊¹, 韦金城^{1,2}, 张东晓³, 安平³, 狄恩州²

1. 山东建筑大学交通工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省交通科学研究院科技创新中心, 山东 济南 250102;
3. 山东交工建设集团有限公司, 山东 日照 276801

摘要:为分析高模量沥青混合料在寒冷地区的应用,将聚烯烃类高模量剂分别掺入90#基质沥青和苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(Styrene-Butadiene-Styrene, SBS)改性沥青,制备高模量改性沥青混合料AC-10-SBS(H)、AC-20-90#(H)、AC-20-SBS(H),分析掺加高模量剂对沥青混合料路用性能的影响。结果表明:掺加高模量剂可有效提高AC-20级配90#基质沥青和SBS改性沥青混合料的路用性能,高模量90#基质沥青混合料低温性能下降,高模量SBS改性沥青混合料低温性能提高并满足规范要求,且汉堡车辙深度、动态模量、冻融强度劈裂比、疲劳寿命最优;AC-10-SBS(H)的低温性能、水稳定性和疲劳寿命优于AC-20-SBS(H),AC-20-SBS(H)的高温稳定性优于AC-10-SBS(H);试验温度为15℃,加载占比为10 Hz时,AC-20-SBS(H)、AC-10-SBS(H)的动态模量相近。建议寒冷地区AC-10型、AC-20型高模量沥青混合料采用聚烯烃类高模量剂-SBS改性沥青组合方式。

关键词:SBS改性沥青;高模量沥青混合料;路用性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)02-0086-07

引用格式:王昊,韦金城,张东晓,等.聚烯烃类高模量沥青混合料路用性能的试验研究[J].山东交通学院学报,2025,33(2):86-92.

WANG Hao, WEI Jincheng, ZHANG Dongxiao, et al. Experimental study on the road performance of high modulus asphalt mixtures with polyolefin additives[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(2):86-92.

0 引言

随着交通强国建设的不断推进,我国高速公路总里程不断增加,重载车辆逐年增多,高速公路的维护作业量增大,其中车辙病害是路面的主要破坏形式^[1]。为解决道路车辙病害问题,可采用低标号沥青生产高模量沥青混合料。在温度为15℃,加载占比为10 Hz条件下,高模量沥青混合料的动态模量大于1.4 GPa,丰富度模数^[2]大于3.4,碾压2万次后汉堡车辙深度小于4 mm,疲劳寿命(应变为 230×10^{-6})不小于100万次。高模量沥青混合料具有较好的高温稳定性和耐久性,能减小路面结构层厚度,节约道路材料。

文献[3-5]采用掺加硬质沥青、外加剂(如纤维、岩沥青等)和高模量剂的方式提高沥青混合料模量。李梦月^[6]采用硬质沥青与丁苯橡胶(Styrene-Butadiene-Rubber, SBR)胶粉制备高模量沥青,能达到沥青路用性能等级PG82-22,沥青混合料的疲劳性能得到明显改善。魏志学^[7]向高模量布敦岩沥青(Buton rock asphalt, BRA)中分别单掺、复掺木质素纤维、聚酯纤维和玄武岩纤维后进行路用性能研究,结果表明掺加纤维均能显著提高高模量沥青混合料的蠕变柔量和抗剪强度,复掺纤维可实现不同纤维对改性沥青性能改善效果的叠加作用,高模量沥青混合料的低温抗裂性能和长期高温稳定性等路用性能有较大提高且效果更均衡。余志刚^[8]研究高模量剂PRM(PRIDUS-TRIE module, PRIDUS-TRIE为法国路面材料实业有限公司)的质量分数对高温、低温路用性能的影响,结果表明沥青混合料的高温抗车辙性能随高模量剂PRM质量分数的增大而升高,但低温时显脆性。通过添加外加剂的方法提高沥青混合料的劲度模量和

收稿日期:2023-11-14

第一作者简介:王昊(1998—),男,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为沥青路面材料,E-mail:3369375930@qq.com。

动态模量,高温性能提高效果显著,但难以兼顾低温性能^[9]。我国北方地区多属寒冷气候,受温度应力的影响,路面内外易产生横向裂缝,破坏路面。在常年低温重载地区,道路应满足抗车辙性能并兼顾低温抗裂性能^[10-13]。

90#基质沥青的针入度较大,软化点、稠度、劲度较低,适合进行沥青改性,可广泛用于我国寒冷地区的道路建设。苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(Styrene-Butadiene-Styrene,SBS)改性沥青的低温松弛能力较好,在降低沥青混合料的温度敏感性和改善低温柔韧性上作用显著。

本文研究向90#基质沥青和SBS改性沥青混合料中掺加聚烯烃类高模量剂,制备高模量沥青混合料,并进行路用性能检测,根据试验数据确定聚烯烃高模量剂与沥青混合料的最优组合方式,以期高模量沥青混合料在我国寒冷地区的推广提供借鉴。

1 原材料

90#基质沥青和SBS改性沥青的常规性能检测结果如表1所示。

表1 2种沥青的常规性能检测结果

材料	针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	(环球法)软化点/℃	延度/cm	闪点/℃
90#基质沥青	87.5	45.6	132.0 ^①	241
SBS改性沥青	70.9	63.4	47.2 ^②	275

①试验温度为15℃;②试验温度为5℃。

将聚烯烃类高模量剂掺入沥青中进行高温剪切制备沥青结合料,高模量剂的质量为沥青的5.0%。掺加高模量剂的沥青结合料的性能指标如表2所示。

表2 掺加高模量剂的沥青结合料的性能指标

项目	软化点/℃	延度 ^① /cm	表观黏度 ^② /(Pa·s)
90#基质沥青	63.0	52.7	2.3
SBS改性沥青	78.6	68.6	2.1
技术要求 ^[14]	≥10.0	≥10.0	≤3.0

①试验温度为25℃;②试验温度为135℃。

采用棱角性好、抗压强度高的优质石灰岩为粗、细集料,粒径分别为>18~26 mm、>11~18 mm、>6~11 mm、>3~6 mm、0~3 mm。以磨细石灰粉为矿粉。根据文献[15]对集料进行性能测试,集料的各项技术指标均满足要求。AC-10和AC-20两种级配组成如表3所示,不同级配类型沥青混合料粗细集料质量分数如表4所示。通过马歇尔体积设计方法,得到AC-10、AC-20的最佳沥青质量分数分别为5.7%、4.4%。

表3 AC-10和AC-20级配组成

筛孔边长/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-10通过率/%	100	100	100	100	96.1	60.2	38.5	30.4	21.1	13.9	9.8	7.1
AC-20通过率/%	100	95.6	84.9	70.3	56.7	39.2	27.6	21.7	14.9	9.5	6.6	4.6

表4 不同级配类型沥青混合料粗细集料质量分数

材料级配 类型	集料质量分数/%					
	粒径为>18~26 mm	粒径为>11~18 mm	粒径为>6~11 mm	粒径为>3~6 mm	粒径为0~3 mm	矿粉
AC-10			36	21	38	5
AC-20	16	28	15	10	28	3

2 试验方案

在沥青混合料拌和过程中加入质量分数为 0.4% 的高模量剂,制备高模量沥青混合料试件。与普通沥青混合料对比,分析掺加高模量剂对沥青混合料路用性能的影响,以及高模量沥青混合料在不同沥青种类与级配类型下的路用性能差异。为方便描述,未掺加高模量剂的沥青混合料的级配与沥青组合方式记为 AC-10-SBS、AC-20-90[#]、AC-20-SBS,掺加高模量剂的沥青混合料的级配与沥青组合方式记为 AC-10-SBS(H)、AC-20-90[#](H)、AC-20-SBS(H)。

车辙试验是在试验温度 70 ℃、接触压强 1 MPa 条件下碾压高模量沥青混合料试件,试件长 300 mm、宽 300 mm、高 50 mm,得到动稳定度。汉堡车辙试验是将 2 个直径 150 mm、高 60 mm 的标准汉堡试件进行温度为 50 ℃ 的水浴,接触压强为 0.7 MPa,以车轮碾压速度为 52 次/min 进行碾压,车辙深度为 12.5 mm 或碾压 2 万次时结束试验。通过碾压次数和汉堡车辙深度评价试件的高温性能。

低温弯曲试验是将长 250 mm、宽 30 mm、高 35 mm 的小梁试件置于温度为-10 ℃ 的试验箱中保温至少 45 min,将试件放置在跨径为 200 mm 的底盘上,采用材料试验机 UTM 在小梁试件的中部施加荷载,加载速度为 50 mm/min,得到试件的破坏强度,采用位移传感器记录试件破坏时的跨中挠度。对每种类型的沥青混合料进行 6 次试验,取 6 次结果的平均值作为最终数据,计算得到抗弯拉应变 R_B 、最大弯拉应变 ϵ_B 和弯曲劲度模量 S_B 。

动态模量试验是通过材料试验机 AST 对高 150 mm,直径 100 mm 的圆柱体试件施加偏移正弦波轴向压应力,得到不同温度(15、25、45 ℃)和加载占比(0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0、20.0、25.0 Hz)下的单轴压缩动态模量。试验前对试件在试验温度(分别为 15、20、45 ℃)下保温 4 h,每种沥青混合料制备 4 个试件。

冻融劈裂试验是通过冻融前、后沥青混合料的残留强度比表征抗水损害能力,在水的冻胀下沥青混合料的劈裂强度损失越小,抗水损害能力越好。每种类型的沥青混合料制作 8 个试件,将试件平均分为 2 组,第 1 组试件在温度为 25 ℃ 的水浴中保温 2 h。第 2 组试件抽真空后放入装有 10 mL 水的塑料袋中,置于温度为-18 ℃ 的恒温箱 16 h,再放入温度为 60 ℃ 水浴中保温 24 h,在温度为 25 ℃ 的水浴中保温 2 h 后进行冻融劈裂试验。

采用四点弯曲疲劳试验测试沥青混合料抵抗重复荷载的能力。将长 380.0 mm,宽 50.0 mm,高 63.5 mm 的小梁试件在试验温度 15 ℃ 下养护 4 h,在温度为 15 ℃、加载占比为 10 Hz,控制恒定应变为 2.30×10^{-4} 的模式下进行四点弯曲疲劳试验。疲劳寿命为试件劲度模量降为 1/2 初始劲度模量时对应加载次数^[16-19]。

3 试验结果与分析

3.1 高温性能

根据第 2 章试验方案进行车辙试验和汉堡车辙试验,试验结果如表 5 所示。

表 5 不同沥青混合料试件的车辙试验和汉堡车辙试验结果

试件	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	汉堡车辙深度/mm	试件	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	汉堡车辙深度/mm
AC-10-SBS	1 443	4.7	AC-10-SBS(H)	2 814	2.9
AC-20-90 [#]	1 891	4.3	AC-20-90 [#] (H)	8 976	2.4
AC-20-SBS	2 458	3.6	AC-20-SBS(H)	8 635	1.6

由表 5 可知:与 AC-10-SBS、AC-20-90[#]、AC-20-SBS 相比,AC-10-SBS(H)、AC-20-90[#](H)、AC-

20-SBS(H)的动稳定度分别增大 95%、375%、251%,汉堡车辙深度分别减小 38%、44%、56%,掺加高模量剂可明显提高沥青混合料的高温稳定性。AC-20-90[#](H)的动稳定度略大于 AC-20-SBS(H),说明高模量剂在提高沥青混合料的抗车辙能力上起主要作用;AC-20-SBS(H)的汉堡车辙深度小于 AC-20-90[#](H),即在浸水碾压条件下,高模量 SBS 改性沥青混合料的高温抗车辙性能更好。AC-20-SBS(H)的动稳定度是 AC-10-SBS(H)的 3 倍,车辙深度比 AC-10-SBS(H)小 1.3 mm,可见级配对高模量沥青混合料的动稳定度影响较大。车辙试验温度由 60 ℃增至 70 ℃,汉堡车辙仪试轮与试件的接触压强由 0.7 MPa 增至 1.0 MPa,该高模量沥青混合料的高温抗车辙表现依旧较好,表明在更高的温度和更大的车轮荷载下此沥青混合料也有较好的高温抗车辙表现。

3.2 低温性能

最大弯拉应变 ε_B 可表征沥青混合料的低温抗裂性。按第 2 章试验方案进行低温弯曲试验,结果如表 6 所示。

由表 6 可知:AC-10-SBS、AC-20-90[#]、AC-20-SBS 的最大弯拉应变均小于 2.600×10^{-3} ,不满足高模量沥青混合料在冬寒区内的低温性能要求^[14]。AC-20-90[#](H)的最大弯拉应变比 AC-20-90[#]减小 2.613×10^{-4} ,表明加入高模量剂后低温抗裂性能下降;AC-20-SBS(H)的最大弯拉应变达到冬寒气候分区内高模量沥青混合料低温抗裂性能的标准,比 AC-20-SBS 增大 20.4%,掺入高模量剂可显著提高 SBS 改性沥青混合料的低温抗裂性。

原因是高模量剂中高分子聚合物与 SBS 沥青中的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物混合后,沥青混合料的劲度模量减小,增强释放荷载应力的能力,实现 SBS 改性沥青与高模量剂的优势叠加^[20-22]。在高模量 SBS 沥青混合料中,AC-10-SBS(H)中 SBS 沥青质量分数较大,AC-10 型沥青混合料的低温柔韧性增强,最大弯拉应变均超过 AC-20 型沥青混合料。

3.3 动态模量

动态模量可表征材料在动态荷载(如振动、冲击或周期性荷载)下的弹性行为。按第 2 章试验方法测得不同沥青混合料试件的动态模量如表 7~9 所示。由表 7~9 可知:高模量沥青混合料的动态模量随温度的升高而减小,随加载占比的增大而增大。高模量剂对提高低温、高频段动态模量的作用效果较明显,动态模量约增大 30%~60%。

表 6 不同沥青混合料试件的低温性能

试件	R_B/MPa	$\varepsilon_B/10^{-3}$	S_B/GPa
AC-10-SBS	11.81	2.239 82	4.846 94
AC-10-SBS(H)	14.27	2.835 91	4.192 53
AC-20-90 [#]	9.56	1.987 53	5.135 04
AC-20-90 [#] (H)	8.58	1.726 25	5.380 83
AC-20-SBS	10.07	2.187 24	4.758 07
AC-20-SBS(H)	12.01	2.633 47	4.371 86

表 7 不同加载占比、不同温度下 AC-10-SBS 和 AC-10-SBS(H) 的动态模量

加载占比/Hz	动态模量/MPa					
	试验温度为 15 ℃		试验温度为 20 ℃		试验温度为 45 ℃	
	AC-10-SBS	AC-10-SBS(H)	AC-10-SBS	AC-10-SBS(H)	AC-10-SBS	AC-10-SBS(H)
0.1	3 564	4 889	2 416	2 883	314	338
0.2	4 266	6 072	2 932	3 575	377	415
0.5	5 150	7 219	3 783	4 530	475	523
1.0	6 147	8 615	4 516	5 417	584	647
2.0	7 174	10 043	5 400	6 460	809	894
5.0	8 913	12 278	6 832	8 197	1 094	1 229
10.0	10 284	14 297	8 008	9 626	1 409	1 549
20.0	11 684	16 317	9 235	11 041	1 819	2 009
25.0	12 320	17 218	9 722	11 635	2 105	2 310

表 8 不同加载占比、不同温度下 AC-20-90[#]和 AC-20-90[#](H) 的动态模量

加载占比/Hz	动态模量/MPa					
	试验温度为 15 ℃		试验温度为 20 ℃		试验温度为 45 ℃	
	AC-20-90 [#]	AC-20-90 [#] (H)	AC-20-90 [#]	AC-20-90 [#] (H)	AC-20-90 [#]	AC-20-90 [#] (H)
0.1	2 186	3 575	1 418	2 463	189	267
0.2	2 882	4 572	1 910	3 283	212	315
0.5	3 936	6 317	2 786	4 643	249	358
1.0	5 155	8 261	3 629	6 047	306	428
2.0	6 472	11 372	4 700	7 843	345	474
5.0	8 379	13 408	6 357	10 495	674	943
10.0	9 931	15 916	7 753	12 822	843	1 090
20.0	11 529	18 477	9 193	15 378	1 074	1 413
25.0	12 178	19 317	9 738	16 239	1 379	1 929

表 9 不同加载占比、不同温度下 AC-20-SBS 和 AC-20-SBS(H) 的动态模量

加载占比/Hz	动态模量/MPa					
	试验温度为 15 ℃		试验温度为 20 ℃		试验温度为 45 ℃	
	AC-20-SBS	AC-20-SBS(H)	AC-20-SBS	AC-20-SBS(H)	AC-20-SBS	AC-20-SBS(H)
0.1	4 047	5 344	3 020	3 463	454	552
0.2	4 706	6 311	3 567	4 168	522	627
0.5	5 801	7 557	4 483	5 171	642	776
1.0	6 808	8 986	5 261	5 842	748	899
2.0	7 932	10 170	6 219	7 201	947	1 137
5.0	9 585	12 573	7 687	8 793	1 263	1 477
10.0	10 957	14 463	8 962	10 343	1 575	1 880
20.0	12 418	16 587	10 310	11 858	1 996	2 394
25.0	13 031	17 209	10 764	12 305	2 259	2 719

试验温度为 15 ℃,加载占比不小于 10 Hz,高模量沥青混合料试件的动态模量均超过 14 GPa,满足要求^[14]。AC-10-SBS(H)、AC-20-90[#](H)、AC-20-SBS(H) 的动态模量比 AC-10-SBS、AC-20-90[#]、AC-20-SBS 分别增大 39%、60%、32%;温度为 15 ℃,加载占比不小于 2 Hz,AC-20-90[#](H) 的动态模量比 AC-20-SBS(H) 大,因为较低温度下高模量剂溶解在沥青中的高分子聚合物交结成网状结构,起到加筋作用^[23];温度为 45 ℃,AC-20-90[#](H) 的动态模量比 AC-20-SBS(H) 小,说明前者的温度敏感性较大。AC-10 和 AC-20 型高模量 SBS 沥青混合料试件在试验温度为 15 ℃ 的动态模量相近,表明低温时动态模量受集料颗粒粒径影响较小。

3.4 水稳定性

通过冻融劈裂试验得到 AC-10-SBS、AC-10-SBS(H)、AC-20-90[#]、AC-20-90[#](H)、AC-20-SBS、AC-20-SBS(H) 的冻融强度劈裂比分别为 82%、89%、78%、85%、80%、87%。AC-10-SBS(H)、AC-20-90[#](H)、AC-20-SBS(H) 的冻融强度劈裂比均满足高模量沥青混合料的冻融强度劈裂比大于 80% 的要求,比 AC-10-SBS、AC-20-90[#]、AC-20-SBS 分别增大 8.5%、8.9%、8.7%,掺入高模量剂后可提高沥青混合料的水稳定性。AC-20-90[#](H) 的冻融强度劈裂比比 AC-20-SBS(H) 小,原因是 SBS 改性沥青能降

低沥青混合料的温度敏感性,掺入高模量剂使得 SBS 改性沥青的黏性增大,沥青与集料间的黏附效果增强,在低温、浸水条件下可较好抵抗水对沥青的剥离作用^[24-25]。AC-10 型高模量 SBS 改性沥青混合料的冻融强度劈裂比比 AC-20 型大,原因是高模量沥青质量分数的增大使沥青膜厚度增大,水不易进入沥青混合料内部,水稳定性更好。

3.5 疲劳性能

通过四点弯曲疲劳试验测得沥青混合料试件在应变为 2.30×10^{-4} 下的疲劳寿命,如表 10 所示。

由表 10 可知:高模量沥青混合料试件的疲劳寿命比未掺加高模量剂的沥青混合料长,AC-10-SBS(H)、AC-20-90[#](H)、AC-20-SBS(H) 的疲劳寿命比 AC-10-SBS、AC-20-90[#]、AC-20-SBS 分别增大 1.4 倍、1.7 倍、1.9 倍,沥青类型及级配不同,疲劳寿命增幅不同;AC-20-SBS(H) 的疲劳性能优于 AC-20-90[#](H),原因是高模量 SBS 改性沥青混合料的初始劲度模量较小,为保持应变不变,所受应力越小,疲劳寿命越高;AC-10 型高模量 SBS 改性沥青混合料的疲劳性能优于 AC-20 型高模量 SBS 改性沥青混合料,沥青越多,SBS 改性沥青使沥青混合料的储存模量增大,抵抗反复变形的能力提高。

表 10 不同沥青混合料试件的初始劲度模量和疲劳寿命

试件	初始劲度模量/MPa	疲劳寿命/次
AC-10-SBS	6 538	1 307 039
AC-10-SBS(H)	7 294	3 152 356
AC-20-90 [#]	7 396	885 361
AC-20-90 [#] (H)	8 778	2 372 583
AC-20-SBS	6 843	967 684
AC-20-SBS(H)	7 479	2 845 441

4 结论

1) 掺加高模量剂的沥青混合料试件 AC-10-SBS(H)、AC-20-90[#](H)、AC-20-SBS(H) 的动稳定度比 AC-10-SBS、AC-20-90[#]、AC-20-SBS 分别增大 95%、375%、251%,汉堡车辙深度分别减小 38%、44%、56%,温度为 15℃ 时动态模量分别增大 39%、60%、32%,冻融强度劈裂比分别增大 8.5%、8.9%、8.7%,疲劳寿命分别增大 1.4 倍、1.7 倍、1.9 倍。在低温性能上,AC-20-90[#](H) 的最大弯拉应变比 AC-20-90[#]减小 2.613×10^{-4} ,高模量 SBS 改性沥青混合料试件的低温性能提高并满足规范要求。

2) 在相同级配下,AC-20-90[#](H) 在高温抗车辙能力、温度为 15℃ 的动态模量略优于 AC-20-SBS(H);AC-20-SBS(H) 在低温抗裂性、水稳定性和疲劳特性优于 AC-20-90[#](H)。AC-10-SBS(H) 与 AC-20-SBS(H) 相比,集料颗粒粒径越大,试件的动稳定度越大,AC-20-SBS(H) 的高温抗车辙性能优于 AC-10-SBS(H);AC-10-SBS(H) 在低温抗裂性、水稳定性和疲劳性能上优于 AC-20-SBS(H);AC-10-SBS(H) 与 AC-20-SBS(H) 在试验温度为 15℃ 的动态模量相近。

综合各项试验结果,建议在冬寒地区使用 AC-10 型和 AC-20 型高模量沥青混合料时,采用聚烯烃类高模量剂-SBS 改性沥青的组合方式。

参考文献:

- [1] 李济鲈. 沥青路面车辙病害形成机理及防控因素分析[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [2] PETHO L, BEECROFT A, GRIFFIN J, et al. High modulus high fatigue resistance asphalt (EME2) technology transfer [R]. [S. l.]: Austroads Ltd., 2014.
- [3] 王联芳,孙立军,吕泉. 岩沥青胶粉复合改性高模量沥青性能研究[J]. 公路交通科技,2024,41(2):1-10.
- [4] 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.
- [5] 王海阳,李宜锋,郑木莲. 不同添加剂下高模量沥青混合料路用性能研究[J]. 中国科技论文,2019,14(9):1004-1009.
- [6] 李梦月. 基于硬质沥青与 SBS 改性沥青分别制备的高模量沥青性能研究[D]. 济南:山东建筑大学,2022.
- [7] 魏志学. 单掺及复掺纤维的高模量沥青混合料路用性能研究[J]. 合成材料老化与应用,2023,52(1):66-69.

- [8] 余志刚. 高模量剂与 SBR 复合改性沥青及其混合料性能研究[J]. 公路工程, 2017, 42(2): 272-277.
- [9] 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.
- [10] 黄新颜, 沙爱民, 邹晓龙, 等. 高模量沥青混合料的性能及适用场合[J]. 公路交通科技, 2016, 33(12): 35-41.
- [11] 郭建民, 徐钦升, 李玉鑫, 等. 高模量沥青混合料两点弯曲复数模量与单轴压缩动态模量关系研究[J]. 公路工程, 2023, 48(6): 160-168.
- [12] 宁毅, 李文凯, 刘向杰. 水-温耦合作用对高模量沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 17-25.
- [13] 吴定知. 不同 RAP 掺量天然高模量沥青热再生混合料性能研究[J]. 路基工程, 2024(5): 109-114.
- [14] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会(SAC/TC 223). 沥青混合料改性添加剂 第8部分: 高模量剂: JT/T 860.8—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [15] 中华人民共和国交通部, 交通部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [16] 中华人民共和国交通运输部, 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [17] 白劭. 玄武岩纤维对高模量沥青混合料路用性能影响研究[J]. 公路与汽运, 2022(1): 57-60.
- [18] 尹应梅, 张奕康, 高宇灏, 等. 高模量温拌改性剂对沥青基本指标和疲劳性能影响研究[J]. 功能材料, 2024, 55(3): 3191-3197.
- [19] 杜银飞, 徐君全, 王志杰, 等. 纤维增强高模量沥青混合料的路用性能表征与机理研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(10): 3898-3908.
- [20] 聂倩. 高模量沥青混合料路用性能试验研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(1): 107-109.
- [21] 吴定知. 不同 RAP 掺量天然高模量沥青热再生混合料性能研究[J]. 路基工程, 2024(5): 109-114.
- [22] 王联芳, 孙立军, 吕泉. 岩沥青胶粉复合改性高模量沥青性能研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(2): 1-10.
- [23] 王国忠, 郝志腾, 李永翔, 等. 复合高模量改性沥青混合料的动态力学性能[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 41-48.
- [24] 李昊, 郭荣鑫, 晏永. 高模量沥青及其混合料低温性能研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(增刊1): 351-365.
- [25] 薛朝辉. PAN 纤维对橡胶粉/SBS 复合改性沥青混合料水稳定性的影响研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(4): 53-55.

Experimental study on the road performance of high modulus asphalt mixtures with polyolefin additives

WANG Hao¹, WEI Jincheng^{1,2}, ZHANG Dongxiao³, AN Ping³, DI Enzhou²

1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Science and Technology Innovation Center, Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250102, China;

3. Shandong Transportation Construction Group Co., Ltd., Rizhao 276801, China

Abstract: To analyze the application of high modulus asphalt mixtures in cold regions, polyolefin-based high-modulus agents are separately added to 90[#] matrix asphalt and Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) modified asphalt to prepare high modulus modified asphalt mixtures AC-10-SBS(H), AC-20-90[#](H), and AC-20-SBS(H). The impact of adding high modulus agents on the road performance of asphalt mixtures is analyzed. The results indicate that: The addition of high modulus agents can effectively enhance the road performance of AC-20 graded 90[#] matrix asphalt and SBS modified asphalt mixtures; the low-temperature performance of high modulus 90[#] matrix asphalt mixtures decreases, while the low-temperature performance of high-modulus SBS modified asphalt mixtures improves and meets regulatory requirements, with optimal values for Hamburg rut

(下转第 109 页)

is established using the finite element software COMSOL to analyze the dynamic mechanical response of the pavement layer under low temperature conditions and the coupling effects of low temperature and dynamic loads. The results indicate that under low temperature conditions, the maximum displacement at the top of the pavement layer reaches 28.75 mm, with an average principal stress of 0.79 MPa. Under the coupling effects of low temperature and dynamic loads, the pavement layer primarily experiences tensile stress, with the tensile stress in the upper layer being greater than that in the lower layer. The tensile stress in the pavement layer increases from the center of the load towards the edges, and the maximum displacement of the pavement layer increases with the increase of the load.

Keywords: concrete bridge; bridge deck; temperature-load coupling; mechanical response

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 85 页)

foaming agent are mixed in a certain mass ratio to achieve a flow value of 160–200 mm. Four different numbers of geogrid reinforcement layers (0, 1, 2, 3 layers) and three wet densities (600, 700, 800 kg/m³) are used. Square geogrids with a side length of 95 mm and rectangular geogrids measuring 95 mm in width and 395 mm in length are placed in the test mold. After curing for 28 days, the specimens are demolded, and foam lightweight soil specimens reinforced with geogrids are prepared. Unconfined compressive strength tests and four-point bending tests are conducted to analyze the effects of wet density and reinforcement layers on the flexural performance of foam lightweight soil from the aspects of displacement-load curves, failure modes, displacement-load characteristics, unconfined compressive strength, and flexural strength. The research findings are as follows: After loading, the reinforced foam lightweight soil transitions from brittle failure to elastic-plastic failure, significantly enhancing the flexural performance of the foam lightweight soil by transmitting load to the interior of the specimen according to the bonding stress mechanism; during the loading process, the foam lightweight soil primarily bear the load in the early stage, while the geogrid mainly bear the load in the later stage; the addition of geogrids significantly improves both the unconfined compressive strength and flexural strength of foam lightweight soil, with the maximum unconfined compressive strength reaching 3.16 MPa and the flexural strength increasing by up to 168%; a predictive equation for unconfined compressive strength based on wet density and reinforcement layers is established, revealing a good correlation between the ratio of unconfined compressive strength to flexural strength and wet density.

Keywords: foam lightweight soil; geogrid; flexural performance; displacement-load curve

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 92 页)

depth, dynamic modulus, freeze-thaw strength splitting ratio, and fatigue life. The low-temperature performance, water stability, and fatigue life of AC-10-SBS(H) are superior to those of AC-20-SBS(H), while the high-temperature stability of AC-20-SBS(H) is better than that of AC-10-SBS(H); at a temperature of 15 °C and a loading frequency of 10 Hz, the dynamic modulus of AC-20 and AC-10 high modulus modified asphalt mixtures are similar. It is recommended that in cold regions, AC-10 and AC-20 high modulus asphalt mixtures adopt a combination of high-modulus agent and SBS modified asphalt.

Keywords: SBS modified asphalt; high modulus asphalt mixture; road performance

(责任编辑:王惠)