

文章编号:1671-6833(2021)02-0098-07

SEBS 改性沥青混合料路用性能研究

马 峰¹, 金彦鑫¹, 傅 珍², 邢海鹏¹

(1.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2.长安大学 材料学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为探讨不同掺量和加载条件下 SEBS 改性沥青混合料的路用性能及自愈合性能变化规律,对 SEBS 改性沥青及沥青混合料进行研究,通过车辙、小梁弯曲、水稳以及四点弯曲疲劳试验对沥青混合料的高温、低温、水稳、抗疲劳及自愈合性能进行评价。结果表明:沥青混合料高温性能随 SEBS 掺量的增加而提高,当掺量超过 4%时增幅较小;SEBS 对沥青混合料的低温和水稳定性改善效果显著;改性后混合料疲劳寿命降低,但初始劲度模量较基质沥青提升明显,二次疲劳加载自愈合后,改性沥青混合料后期模量与疲劳寿命显著优于基质沥青。SEBS 的掺入,显著提升了沥青混合料的路用性能与自愈合寿命,同时其劲度模量有所提升,从而降低了混合料的初始疲劳寿命。

关键词:SEBS; 高温性能; 低温抗裂性能; 水稳性能; 抗疲劳性能; 自愈合

中图分类号:U414 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2021.02.002

0 引言

近年来随着公路交通的高速发展,车辙、开裂、松散等路面病害愈发严重^[1]。目前,SBS 外掺剂因其对沥青的高低温性能改善效果优异而普遍应用于工程实践领域,然而在外界光热作用下,SBS 外掺剂易因不饱和双键降解致使其结构和性能大幅度降低甚至恶化^[2]。

SEBS 是基于 SBS 选择性加氢得到的以聚苯乙烯为末端硬嵌段,以聚丁二烯加氢得到的乙烯-丁烯共聚物为中间弹性嵌段的线型三嵌段共聚物^[3]。郑传峰等^[4]、朱明广等^[5]、胡明君等^[6]、马峰等^[7]研究表明,SEBS 加入后可显著改善沥青的基本物理性能及混合料的高低温性能,抗水损害及抗紫外老化能力,故未来研究前景十分广阔。Zhang 等^[8]、Vargas 等^[9]、Zapién-castillo 等^[10]、Ouyang 等^[11]分别采用蒙脱石、高岭土及顺丁烯二酸酐对 SEBS 进行复合改性,发现改性后沥青具有较高的储存稳定性。解建光等^[12-13]借助星点设计-效应面法,得出 SEBS 改性沥青最佳工艺参数,同时指出以石灰石作为填料可明显提高 SEBS 改性沥青与酸性花岗岩集料的水稳定性。Si Bachar 等^[14]研究发现基质沥青经 SEBS 改性

后,沥青材料的黏弹性和抗车辙能力明显提升,且 5%SEBS 改性沥青在老化后具有较高的抗疲劳开裂性能。Zheng 等^[15]通过研究发现 SEBS 改性沥青混合料的拉伸应力比、抗张强度、拉伸应变、疲劳寿命、路用性能较 SBS 改性沥青混合料均有所提升。然而目前主要针对 SEBS 改性沥青的基本物理、流变性能及储存稳定性进行研究,对 SEBS 改性沥青混合料的疲劳性能、自愈合性能未有全面的研究成果。

鉴于此,本文采用沥青高速剪切机制备不同掺量的 SEBS 改性沥青并进一步得到改性沥青混合料,通过高温稳定性试验、低温抗裂性试验、冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验以及四点弯曲疲劳试验对混合料的高温、低温、水稳、抗疲劳及自愈合性能进行评价,并研究不同掺量对沥青混合料路用性能的影响规律。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

研究选用中石化巴陵石化 YH-503 SEBS 材料,其技术参数见表 1,外观形貌见图 1。基质沥青选用 SK-90#A 级,主要技术指标见表 2。混合料所选用的集料和矿粉均为玄武岩。

表 1 SEBS(YH-503) 基本性能指标

Table 1 Technical parameters of SEBS(YH-503)

型号	结构	苯乙烯 质量分数/%	扯断拉伸 强度/MPa	300%定伸 应力/MPa	扯断伸长率/ %	邵氏 A 硬度/ HA	体积分数 10%甲苯 溶液黏度/(MPa·s)
YH-503	线性	33	25	6.0	500	77	1 500



图 1 SEBS(YH-503)

Figure 1 SEBS(YH-503)

表 2 SK-90#道路石油沥青技术指标

Table 2 Properties of CNOOC SK-90# road asphalt

检测项目	规定值	测试值
针入度(25℃,5 s,100 g)/0.1 mm	80~100	87.0
软化点(R&B)/℃	≥45.0	47.5
延度(5 cm/min,10℃)/cm	≥20.0	121
延度(5 cm/min,15℃)/cm	≥100	>100
闪点(COC)/℃	≥245	>300
含蜡量(蒸馏法)/%	≤2.20	1.80
薄膜加热 残留针入度/%	≥57.0	74.6
试验 延度(10℃)/cm	≥8.00	≥8.00
(163℃,5 h) 延度(15℃)/cm	≥8.00	≥100

1.2 混合料制备及试验方案

改性沥青制备:采用高速剪切机将一定质量的 SEBS 剪切入基质沥青中,剪切机转速、剪切温度、剪切时间分别为 5 000 r/min、170℃、45 min。剪切后在 170℃烘箱内溶胀发育 60 min,得到 SEBS 改性沥青。制备过程中,分别将质量分数为 2%、4%、6%、8% 掺量(如无特别说明,本文掺量均为质量分数)的 SEBS 掺加到基质沥青中,得到不同掺量的 4 组改性沥青,基本性能指标见表 3。

表 3 SEBS 改性沥青性能指标

Table 3 Properties of SEBS modified asphalt

SEBS 掺量/ %	针入度(25℃, 5 s,100 g)/ 0.1 mm	软化点 (R&B)/ ℃	延度 (5 cm/min, 5℃)/cm	延度 (5 cm/min, 10℃)/cm
2	72.0	49.0	38.1	55.3
4	59.0	53.0	33.7	52.7
6	52.0	58.5	29.4	48.0
8	41.0	66.5	26.2	41.7

混合料制备:首先对集料合理筛分并按照规范进行级配设计,采用初始设计孔隙率为 4%的 AC-13 型级配,并根据马歇尔试验对各掺量 SEBS 改性沥青的最佳油石比(质量分数,下同)进行设计,试验后最佳油石比如表 4 所示;其次,将确定级配集料、SEBS 改性沥青和称量好的矿粉经沥青拌合锅加热拌合,得到各掺量的改性沥青混合料;最后将不同掺量沥青混合料置于相应的试验试模中,并使试件成型。

表 4 SEBS 改性沥青混合料最佳油石比

Table 4 Optimum bitumen-aggregate ratio of SEBS modified asphalt mixture

SEBS 掺量	0	2	4	6	8
最佳油石比	4.49	4.61	4.73	4.89	5.01

试验方案:根据 JTG E20—2011《公路工程沥青混合料试验规程》^[16]规定的高温车辙、低温弯曲、浸水马歇尔、冻融劈裂、疲劳试验方法,对不同改性剂掺量下混合料试件进行路用性能试验。根据试验结果分析改性沥青混合料的高、低温特性,水稳定性以及抗疲劳特性,以此为基础研究不同掺量 SEBS 改性剂对沥青混合料路用性能的影响规律。

2 结果分析与讨论

2.1 高温稳定性

在最佳油石比下制备试件,采用车辙试验测定不同 SEBS 掺量改性沥青混合料动稳定度,试验结果如图 2 所示。

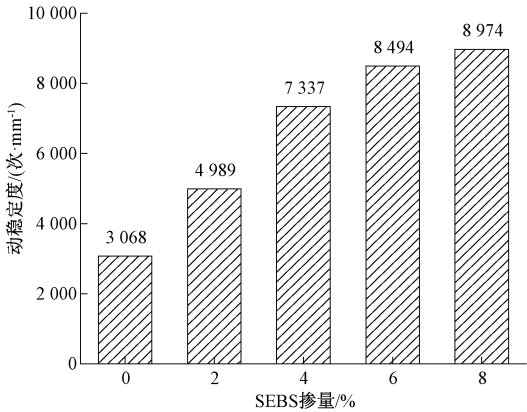


图 2 最佳油石比改性沥青混合料车辙试验

Figure 2 Rutting test of modified asphalt mixture with optimum bitumen-aggregate ratio

由图 2 可知,改性沥青混合料动稳定度随 SEBS 掺量增加而明显提升。SEBS 掺量由 0 变化至 4%时,动稳定度由 3 068 次/mm 提升至 7 337 次/mm,增幅为 139.1%,这是因为 SEBS 改性剂吸附沥青中的轻质组分发生溶胀现象,进而形成网状结构,故低掺量改性沥青混合料高温稳定性增长速率较大^[17];SEBS 掺量由 4%变化至 8%时,动稳定度提升至 8 974 次/mm,增幅为 22.3%,增幅较小,这是由于受到轻质组分含量限制,溶胀有一定的界限,故高掺量改性沥青混合料高温稳定性增长速率逐渐衰减。因此,仅从增幅角度来看,4%掺量的 SEBS 沥青混合料更具经济效益。

为排除混合料油石比对高温稳定性的影响,测定油石比分别为 4.5%、4.7%、4.9%、5.1%、5.3%的改性沥青混合料的动稳定度,试验结果见表 5。

表 5 不同油石比改性沥青混合料的动稳定度					
Table 5 Dynamic stability of modified asphalt mixture with different bitumen-aggregate ratio					
SEBS 掺量/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)				
	4.5%	4.7%	4.9%	5.1%	5.3%
0	3 068	3 398	3 627	3 294	3 160
2	4 875	5 130	4 981	4 189	3 786
4	6 971	7 337	7 849	6 274	5 169
6	9 898	9 289	8 479	7 519	6 265
8	11 563	10 496	9 460	8 279	6 960

由表 5 可见,SEBS 掺量小于 4%时,动稳定度峰值出现在最佳油石比左右,表现出优异的高温稳定性;SEBS 掺量大于 4%时,SEBS 改性沥青混合料的动稳定度随油石比的增加而降低,说明高掺量 SEBS 改性沥青混合料在相对较少的沥青用量下有助于提高其高温稳定性。

SEBS 改性沥青混合料的高温稳定性不仅受沥青中轻质组分的影响,同时也与混合料油石比有关。尽管油石比的变化会改变同一掺量混合料中动稳定度峰值的分布,但各油石比下,SEBS 改性沥青混合料的动稳定度依旧随 SEBS 掺量增加而提高。这也验证了最佳油石比下车辙试验中动稳定度增幅发生变化的原因:低掺量混合料动稳定度增长较快是由于掺量和油石比都起到了促进作用;而高掺量条件下高温性能增幅减缓,是由掺量的促进作用和油石比的削减作用共同导致。

2.2 低温抗裂性

采用低温小梁弯曲试验所得的最大弯拉应变和劲度模量指标来表征最佳油石比下改性沥青混

合料的低温性能,试验结果见图 3。

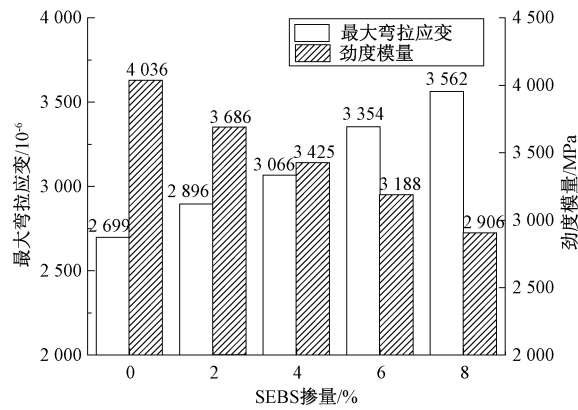


图 3 最佳油石比改性沥青混合料低温小梁弯曲试验
Figure 3 Low-temperature trabecular bending test of modified asphalt mixture with optimum bitumen-aggregate ratio

由图 3 可以看出,随 SEBS 掺量的增加,混合料最大弯拉应变增加,劲度模量降低。表明 SEBS 改性剂的掺入,显著提高了混合料的低温柔韧性和集中荷载状况下的松弛性能,从而改善了沥青混合料的低温抗裂性。原因在于:SEBS 掺量较少时,SEBS 改性剂未在沥青中形成稳定的网状结构相体,混合料脆性较高且柔韧性较差;随着 SEBS 掺量的增加,改性剂与沥青彼此交联,溶胀发育成完整网状结构,改善了沥青混合料的温度敏感性,进而提升了混合料的低温抗裂性。

为避免油石比对试验结果产生影响,以 4.9%油石比制备试件,分别测定 5 种不同掺量下改性沥青混合料的最大弯拉应变,试验结果如图 4 所示。

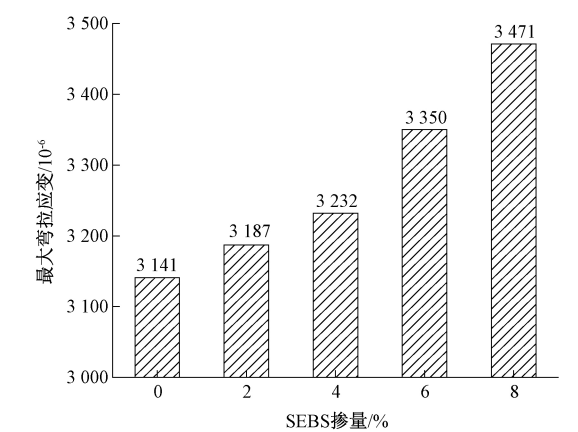


图 4 4.9%油石比改性沥青混合料低温小梁弯曲试验
Figure 4 Low-temperature trabecular bending test of modified asphalt mixture with 4.9% bitumen-aggregate ratio

由图 4 可见,SEBS 掺量小于 4%时,改性沥青

混合料的破坏弯拉应变随掺量的增加缓慢提升。这主要是因为低掺量改性沥青混合料中 SEBS 游离分布于沥青胶结料中,以沥青为连续相富集态,混合料的弯拉强度主要由沥青提供,SEBS 仅改善了沥青的柔韧性和黏附性,对沥青混合料的最大弯拉应变提升效果并不明显。SEBS 掺量大于 4% 时,改性沥青混合料的破坏弯拉应变随掺量的增加迅速提升。这是由于随着 SEBS 掺量的增加,改性剂彼此交织形成网状结构相体,因微观结构的改变使改性沥青的弯拉强度、柔韧性、松弛性能显著提升,进而提高了沥青混合料的低温抗裂性。最佳油石比和定油石比下最大弯拉应变均与 SEBS 掺量存在关联,即 SEBS 的加入可显著降低改性沥青的温度敏感性,进而提高混合料的抗弯拉强度;定油石比混合料以 4% 掺量为界限,弯拉应变增长速率明显不同,说明不同油石比下,SEBS 改性沥青混合料的最佳掺量不同,因此仅考虑 SEBS 掺量来评价改性沥青混合料的低温性能存在一定的局限性。

2.3 水稳定性能

研究最佳油石比下 SEBS 改性沥青混合料的冻融劈裂比 (TSR) 和残留稳定度,分析不同掺量 SEBS 改性剂对沥青混合料水稳定性的影响,试验结果见图 5。

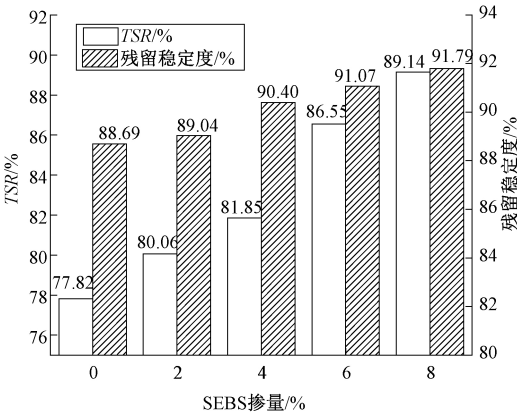


图 5 冻融劈裂抗拉强度比和残留稳定度
Figure 5 Freeze-thaw splitting tensile strength ratio and residual stability

由图 5 可见,冻融劈裂抗拉强度和残留稳定度均与 SEBS 掺量呈正相关,但增幅不同 SEBS 掺量由 0 变化至 8% 时,TSR 由 77.82% 增长至 89.14%,提升了 14.55%;而 SEBS 改性沥青混合料经 48 h、60℃ 水浴后的残留稳定度与基质沥青混合料基本相同,增幅比 TSR 增幅小。结果表明,SEBS 可提高沥青混合料的水稳定性,尤以冻融循环后的改善效果最为显著。

根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[18] 对改性沥青路面要求,2% 掺量的 SEBS 改性沥青 TSR 和残留稳定度已满足规范要求,且高掺量的 SEBS 表现出更好的水稳性能。

2.4 抗疲劳性能

采用四点弯曲疲劳试验 (4PB),以 200×10^{-6} 、 250×10^{-6} 、 300×10^{-6} 3 个应变等级分析老化前后基质及各掺量 SEBS 改性沥青混合料的劲度模量和疲劳寿命。15℃ 条件下恒应变半正弦疲劳试验结果见图 6。

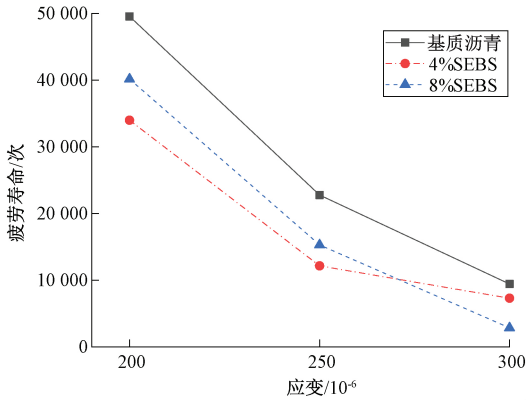


图 6 应变-疲劳寿命变化曲线
Figure 6 Strain-fatigue life trend chart

由图 6 可见,不同应变水平下 SEBS 改性沥青混合料的疲劳寿命均低于基质沥青,且随控制应变的增加疲劳寿命逐渐降低。当应变水平为 200×10^{-6} 、 250×10^{-6} 时,疲劳寿命随 SEBS 掺量增加而提升;应变水平增加至 300×10^{-6} 时,4% 掺量 SEBS 沥青路面疲劳寿命降为 7 368 次,8% 掺量 SEBS 沥青路面疲劳寿命降为 2 976 次,低掺量 SEBS 沥青路面疲劳寿命反高于高掺量 SEBS 沥青路面疲劳寿命,表明高应变水平下沥青混合料的疲劳寿命与 SEBS 掺量并非直接负相关,即高掺量 SEBS 反而会削减改性沥青混合料的疲劳寿命。

2.5 自愈合性能

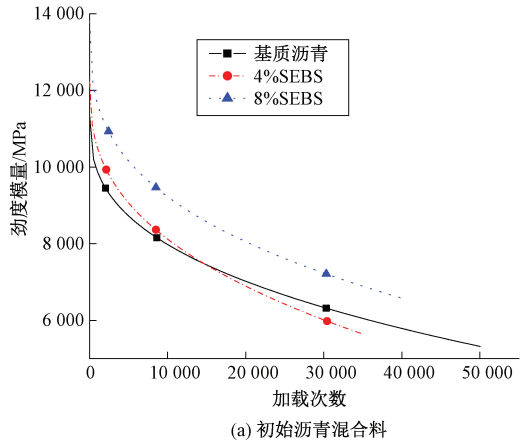
为研究 SEBS 改性沥青混合料自愈合性能,在 15℃ 首次加载结束后,将试件置于 50℃ 下保温愈合 6 h,再转至 15℃ 保温 2~4 h,最后进行二次加载试验,具体试验参数见表 6。以初始第 50 次循环测得的劲度模量值作为初始模量,并以降低至初始劲度模量值的 50% 作为试验终止条件,试验结果见图 7。

由图 7(a) 可见,SEBS 的掺入可明显提高沥青混合料的初始劲度模量,且以 8% 掺量时趋势较为明显,这可能是因为高掺量 SEBS 致使沥青混合料发生相的转变,形成稳定的三维网状结构,

表 6 自愈合试验参数

Table 6 The parameters of self-healing test

SEBS 掺量/%	加载 波形	频率/ Hz	应变/ 10 ⁻⁶	自愈合 温度/℃	间歇 周期/h
0	半正弦波	10	200	50	6
4	半正弦波	10	200	50	6
8	半正弦波	10	200	50	6



导致混合料的劲度模量明显提高。此外,4% SEBS 改性沥青混合料与基质沥青混合料的劲度模量随循环次数增加拟合效果较好。但相同加载次数下,4%掺量混合料劲度模量下降速率较快,这可能是因为低掺量混合料依旧以沥青为连续相富集态,由不完整的三维网状结构导致。

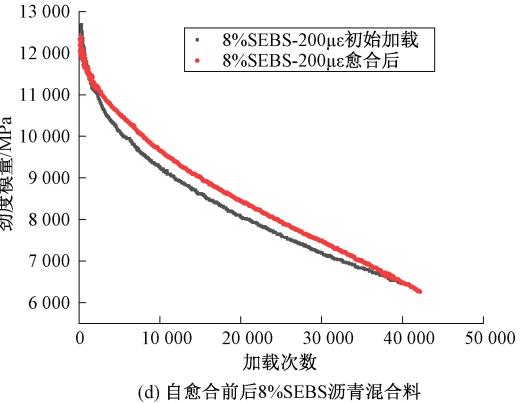
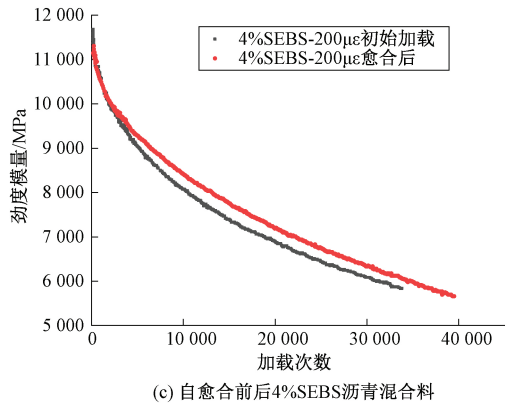
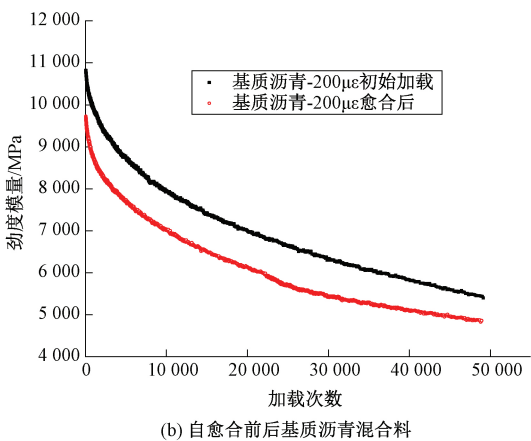


图 7 加载次数-劲度模量关系曲线

Figure 7 Loading times-stiffness modulus curve

从图 7(b)可以看出,基质沥青混合料自愈合后初始劲度模量降低,模量曲线近似为初始加载曲线整体向下平移,整体趋势未有明显变化。疲劳加载初期,混合料试件劲度模量变化曲线斜率较大,在疲劳稳定阶段,疲劳损伤曲线趋于平缓,说明老化后基质沥青混合料疲劳寿命略有降低。

对比图 7(c)、7(d)可见,4%和 8%SEBS 改性沥青混合料的劲度模量初始加载与愈合后首次加载相近,且后期降低速率略缓于初次加载,疲劳寿命较首次加载均有所提升。说明在疲劳老化条件下,SEBS 改性沥青混合料的抗疲劳性能优于基质沥青,这可能是由于在保温愈合条件下,SEBS 改性沥青胶结料由固态逐渐转变成固-液二相胶体材料并填充于疲劳裂缝间,使其与集料的黏结强度明显提升,因此 SEBS 改性沥青-集料界面体系难以破坏。故老化前 SEBS 的掺加会降低混合料

的疲劳寿命,然而通过一定条件保温愈合后,改性沥青混合料的后劲度模量显著优于基质沥青,且随掺量的增加而逐步提升,表现出优异的自愈合性能。

3 结论

- (1)最佳油石比下,沥青混合料动稳定度随 SEBS 掺量的增加而提高,SEBS 掺量由 0 变化至 4%时,动稳定度提升 139.1%,增幅较大;由 4%变化至 8%时,增幅为 22.3%,故 4%掺量 SEBS 改性沥青混合料更具经济效益。在不同油石比下,小于 4%掺量混合料在最佳油石比处呈现动稳定度的峰值,而大于 4%掺量 SEBS 改性沥青混合料则在相对较少的沥青用量下表现出优异的高温稳定性。
- (2)SEBS 的加入可显著降低改性沥青的温

度敏感性进而提高混合料的抗弯拉强度,且掺量越高效果越明显;定油石比混合料以 4% 掺量为界限,弯拉应变增长速率明显不同,即低掺量 SEBS 改性沥青混合料低温抗裂性能未有高掺量改性剂提升效果显著。

(3)在改善沥青路面抗水损害能力方面,改性沥青混合料冻融劈裂比与残留稳定度均优于基质沥青,且随 SEBS 掺量的增加,水稳定性越好。

(4)SEBS 的掺入使沥青混合料的疲劳寿命降低,但初始劲度模量要明显高于基质沥青,且掺量越高,混合料的劲度模量越大;SEBS 改性沥青混合料二次疲劳加载自愈合后,改性沥青混合料试件的后期模量和疲劳寿命要显著优于基质沥青,且随掺量的增加逐步提升,表现出优异的自愈合性能。

参考文献:

[1] FU Z, DANG Y N, GUO B, et al. Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis[J].Journal of traffic and transportation engineering (english edition),2016,3(5):412-426.

[2] 耿九光,常青,原健安,等. 用 GPC 研究 SBS 改性沥青交联结构及其稳定性[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008,29(2): 14-17.

[3] ZHU J Q, BIRGISSON B, KRINGOS N. Polymer modification of bitumen: advances and challenges[J].European polymer journal,2014,54:18-38.

[4] 郑传峰,陈浩,苏俊省,等. SEBS 改性沥青试验研究[J].公路工程,2011,36(2):34-37.

[5] 朱明广,李文志,于猛,等. SEBS 和 SBS 对沥青性能影响的差异研究[J].中国建筑防水,2017(6):5-8.

[6] 胡明君,雷刚,岳阳,等. 基质沥青和 SEBS 改性沥青低温黏结强度定量测试[J]. 公路, 2017, 62(6): 260-262.

[7] 马峰,董文豪,傅珍,等.基于流变学的 SEBS/橡胶粉复合改性沥青低温性能研究[J].功能材料,2019,

50(6):6083-6087,6094.

[8] ZHANG F, HU C B, ZHANG Y. Research for SEBS/PPA compound-modified asphalt[J].Journal of applied polymer science,2018,135(14):46085.

[9] VARGAS M A, MANERO O. Rheological characterization of the gel point in polymer-modified asphalts[J].Journal of applied polymer science,2011,119(4):2422-2430.

[10] ZAPIÉN-CASTILLO S, RIVERA-ARMENTA J L, CHÁVEZ-CINCO M Y, et al. Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite [J]. Construction and building materials,2016,106:349-356.

[11] OUYANG C F, WANG S F, ZHANG Y, et al. Thermo-rheological properties and storage stability of SEBS/kaolinite clay compound modified asphalts [J]. European polymer journal,2006,42(2):446-457.

[12] 解建光,钱春香,肖庆一.星点设计-效应面法优化 SEBS 改性沥青工艺参数[J].公路交通科技,2004,21(2):19-21,25.

[13] 解建光,钱春香,肖庆一. SEBS 改性沥青混合料水稳定性性能的试验分析[J].公路,2004,49(2):126-129.

[14] Si BACHIR D, DEKHLI S, AIT MOKHTAR K, et al. Rheological evaluation of ageing properties of SEBS polymer modified bitumens[J].Periodica polytechnica civil engineering,2016,60(3):397-404.

[15] ZHENG C F, WANG L, ZHAO D J. Experimental study on pavement performance of SEBS modified asphalt mixture [J].Advanced materials research,2010,168-170:906-911.

[16] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[17] 陆晶晶.橡胶沥青性能影响因素与改性机理研究[D].西安:长安大学,2010.

[18] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京:人民交通出版社,2004.

Road Performance of SEBS Modified Asphalt Mixture

MA Feng¹, JIN Yanxin¹, FU Zhen², XING Haipeng¹

(1.School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2.School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to explore the changing law of the road performance and self-healing performance of SEBS modified asphalt mixture in different content and loading conditions, the SEBS modified asphalt and the

asphalt mixture were studied. The high and low temperature properties, water-stability properties, self-healing and fatigue properties of SEBS modified asphalt mixture were evaluated by the rutting test, beam bending test, water-stability test, and four-point bending fatigue test. The results showed that dynamic stability increased with the increase of the SEBS content, and the increase was small when the content exceeded 4%. The incorporation of SEBS could significantly improve the low temperature performance and water stability of the asphalt mixture after freeze-thaw cycles. The fatigue life of the modified asphalt mixture was reduced, but the initial stiffness modulus was significantly higher than that of the base asphalt. After self-healing of secondary loading, the late modulus of the modified asphalt mixture and its fatigue life were significantly higher than the base asphalt mixture. The incorporation of SEBS could significantly improve the road performance and self-healing life of the asphalt mixture, but the increase of stiffness modulus, thereby reducing the initial fatigue life of the mixture.

Key words: SEBS; high temperature performance; low temperature crack resistance; water stability; fatigue resistance; self-healing

(上接第 36 页)

Analysis on Factors Affecting the Capability of Collapse of Reinforced Concrete

CHEN Weihong¹, LIU Fanghao¹, QIAO Zehui¹, CUI Shuangshuang²

(1.School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fujian 350108, China; 2.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to examine on the factors to collapse resistance of the structure, the ABAQUS finite element model was firstly verified and calibrated by using the progressive collapse test results of the two-layer concrete plane frame. Then 15 three-story and four-span concrete plane frames were established to carry out the progressive collapse analysis on three parameters based on the verified model. The parameters included the failure of the middle column of the different layers, the reinforcement ratio at the bottom of the beams, and the reinforcement ratio at the top of the beams. The results showed that the lower the floor where the failure of the center column is, the more difficult the catenary action is to play a role. The improvement of the reinforcement ratio at the bottom of the beams had no positive effect on the catenary action. The catenary action of the structure was weakened when the reinforcement ratio was too high. The increase in the reinforcement ratio of the upper part of the beam could significantly enhance the catenary action of the structure. The energy dissipation at the catenary action accounted for at least 70% of the total energy dissipation during the collapse process. Thus, the contribution of the catenary action should be considered when evaluating the structural robustness.

Key words: RC frame structure; progressive collapse; catenary action; column loss; reinforcement ratio