

不同设计目标下沥青混合料的疲劳性能

黄明^{1,2}, 温学钧¹, 黄卫东², 徐健¹

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 选用目前最为先进与常用的4点弯曲疲劳试验, 对常用的包括70#基质沥青和常用的改性沥青在内的10种沥青混合料进行了15℃及 $1\,000\times 10^{-6}$ 应变控制下的疲劳试验, 并进行二次疲劳试验, 兼顾了改性沥青的自愈合效果, 完成了相同沥青用量下和相同体积设计目标下的各沥青混合料的疲劳性能对比, 以及针对相同高温性能和疲劳性能的双向分级, 以提供实际工程时混合料设计之前的参考, 最后还依据所有试验数据绘制了相应的疲劳性能和高温性能分区散点图以供直观参考。

关键词: 改性沥青; 混合料设计; 疲劳性能; 自愈合

中图分类号: U414

文献标志码: A

Fatigue Performance of Asphalt Mixtures with Different Design Goals

HUANG Ming^{1,2}, WEN Xuejun¹, HUANG Weidong², XU Jian¹

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: 10 kinds of asphalt mixtures, including base asphalt and the commonly-used modified asphalt, were researched by fatigue tests by taking self-healing into account, where four-point bending beam(4PB) was selected, at the temperature of 15℃ with $1\,500\times 10^{-6}$ strain, as well as the second fatigue tests were performed, therefore, the effect of the modified asphalt was considered. Researches were carried out in the same asphalt content, the same volume design goal, fatigue performance were compared, and the same temperature performance classification, the fatigue performance was graded, which was a kind of bidirectional hierarchical method, providing reference for the design of asphalt mixture in the actual project. Finally, a partition scatterplot was drafted for mix design reference based on the

test results.

Key words: modified asphalt; mixture design; fatigue performance; self-healing

随着沥青路面的疲劳破坏受到广泛的重视, 越来越多国家的沥青路面设计方法均以路面疲劳性能作为基本的设计评价指标^[1-3], 目前这些研究成果中所涉及的疲劳性能的数据大多是针对基质沥青, 而我国的较高等级沥青路面建设选用了大量的改性沥青, 改性沥青组成复杂, 改性剂种类众多, 特性各异, 影响疲劳性能的因素较基质沥青更为纷繁复杂, 与基质沥青的表现存在很大的不同. 故此前的经验并不能直接用于指导现行设计. 此外更为重要不同还在于改性沥青存在较为明显的自愈合现象, 即在材料产生微小裂缝后在某种条件下可以实现强度(或劲度)的自我修复. 截至目前, 多方研究已经确定这一现象的存在^[4-6], 也已确定一些影响因素与之相关^[7-8]. 此前国内外关于沥青混合料的疲劳研究中, 由于较少考虑其自愈合性能, 不同程度的忽视了其优异的疲劳性能, 偏于保守的评价给材料与结构设计带来了一定的浪费, 在研究者此前的研究中已有过较为详细的阐述^[9]. 因此, 进行较为全面的且考虑自愈合的改性沥青混合料的疲劳性能十分有必要。

共选取了10种不同的沥青混合料, 其中包括SBS、橡胶沥青等在内的多种改性沥青, 辅以基质沥青作为对比, 先后进行两次疲劳试验, 目的在于考虑自愈合补偿情况下的疲劳性能, 并对这些沥青混合料的疲劳性能进行按不同的设计目的进行等级划分. 将对比基于三种情况下的疲劳性能的分析, 旨在将室内疲劳试验数据进行归纳和概括, 可为在路面

收稿日期: 2014-12-09

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2014-K1-025); 上海建工集团2014科技项目(14ZFC-01); 上海市市政工程设计研究总院2014科技项目(K2014K028)

第一作者: 黄明(1985—), 男, 高级工程师, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为新型路面材料与结构. E-mail: huangming@smedi.com

通讯作者: 温学钧(1962—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为道路工程. E-mail: wenxuejun@smedi.com

结构与材料设计时提供数据支撑和参考。

1 试验材料和试验方法

1.1 沥青和改性剂

基质沥青采用埃索 70 #, 硬质沥青选用中海泰州 30 # 沥青(针入度为 3.3 mm, 软化点达 92 ℃)。SBS(苯乙烯—丁二烯—苯乙烯三嵌段共聚物)改性沥青选取 4.5% 的 SBS 掺量; 橡胶沥青的制备选取浙江金华产 40 目胶粉, 掺量为内掺 20%; PE(聚乙烯)占混合料的 0.5%, PE-AC13 采用干法工艺; 岩沥青-AC13 中岩沥青为印度尼西亚产天然岩沥青, 占改性沥青的 10%。另需特别指出的是, 研究采用了 Terminal Blend(TB) 及其复合改性沥青, 该沥青一般采用 30 目或者更细的胶粉颗粒改性, 在沥青中发生脱硫反应, 通常储油罐中无需专门搅拌即可保持均匀分散并稳定存储, 在早前的研究中称作无搅拌湿法或沥青库法, 由于工艺的变化, 更为准确的名称应为 TB 胶粉改性沥青^[10]。TB 及其复合改性沥青均采用 20% 的胶粉掺量。改性方案如表 1 所示。基质沥青及各改性沥青均满足规范相关要求。

表 1 改性沥青的改性方案

Tab.1 Modified ways of modified asphalt

分类	改性方案
SBS 改性沥青	SBS 掺量 4.5%
橡胶沥青	40 目胶粉掺量 20%
TB	胶粉掺量 20%
TB+SBS	SBS 掺量为复合改性沥青的 3%
TB+岩沥青	岩沥青掺量为复合改性沥青的 20%
TB+PE	PE(聚乙烯)占混合料的 0.5%(干法)
PE	PE(聚乙烯)占混合料的 0.5%(干法)
岩沥青	岩沥青占沥青总量的 10%

1.2 集料和级配

粗集料采用江苏溧阳产玄武岩, 细集料为浙江安吉产石灰岩, 填料使用浙江安吉产石灰石矿粉。集料各项指标均能满足规范要求。

基质沥青混合料采用了基质 70 # 沥青 AC-13 和 30 # 硬质沥青 AC-13, 橡胶沥青混合料采用 ARAC-13, 其余改性沥青混合料均采用 AC-13。ARAC-13 根据美国亚利桑那州推荐的技术规范实施^[11], 其余混合料试验所用级配按我国施工规范^[12]所提供级配范围的中值。

1.3 试验方法和试验指标

1.3.1 试验方法

所有试验均采用小梁疲劳分析仪(Beam Fatigue Analyzer, 简称 BFA), 为澳大利亚 IPC 公司

生产, 为气动伺服提供动力, 相比此前用在万能材料试验机(MTS)上的疲劳小梁, BFA 小梁尺寸较大, 控制更为精确, 另外 BFA 使用精度更高的位移和力传感器从理论角度会使得试验结果更加准确。温度控制方面, BFA 自带恒温环境箱, 密闭性能良好, 在中控器上有温度传感器接口, 可以实时记录试验温度, 环境箱也可用于实现不同温度下的疲劳试件, 温度可控制在 -20~60 ℃, 精度达 0.1 ℃, 加载应变范围为 0~2 000 $\mu\epsilon$ 。图 1 为 BFA 小梁试验小梁在夹具中的受力的示意图, 图 2 为 BFA 小梁试验夹具图。根据我国规范^[13]中试验环境, 所有试验在 15 ℃ 环境下进行, 采用应变模式, 应变量为 1 000 $\mu\epsilon$ 。故所有结果仅对 1 000 $\mu\epsilon$ 级别有效。选取 1 000 $\mu\epsilon$ 是基于大量的先期试验的总结, 因为较低的应变量会使得试验时间过长, 且混合料多采用较高沥青用量的改性沥青, 其疲劳与自愈合性能均强于一般普通沥青, 根据课题组研究者此前的研究^[9]表明, 不同的应变存在对数线性换算关系, 试验结果具有参考作用。

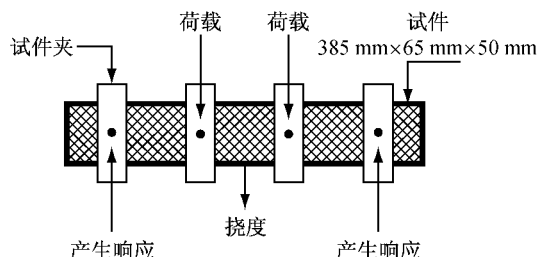


图 1 BFA 四点弯曲受力示意图

Fig.1 Loading characteristics of 4-point bending test on the BFA

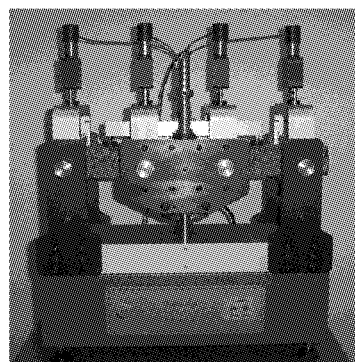


图 2 四点弯曲夹具

Fig.2 4-point bending fixture on BFA

1.3.2 疲劳寿命定义标准

研究涉及 2 种定义标准, N_{f50} 法和 N_{fNM} 法。 N_{f50} 法为 SHRP-A303 中推荐的疲劳试验的判断方法。许多试验证实了疲劳破坏发生在 40% 的初始模量降低处, 据此, SHRP-A303 中推荐衰减至 50% 的初始

劲度模量减少作为疲劳试验的判断标准即疲劳寿命 N_{f50} 法,形成的 AASHTO TP-8 标准. N_{fNM} 法是源自美国 ASTM D7460 的方法,最先由 Rowe 和 Bouldin^[2] 研究提出. 此法的疲劳破坏点定义为归一化劲度次数积比值(normalized modulus \times cycles)在荷载次数图中的峰值时的加载次数. 对归一化劲度次数积比值的获取如下:

$$N_M = \frac{S_i \times N_i}{S_0 \times N_0}$$

式中: N_M 为归一化劲度次数积比值; N_i 为加载次数; S_i 为第 i 次加载时时间的劲度模量; S_0 为初始劲度模量,取第 50 次加载时的劲度模量; N_0 为初始次数,取 50. 当 N_M 达到最大值时候的 N_i 即为材料的疲劳破坏次数 N_{fNM} .

图 3 和图 4 分别展示了一根试件采用两种不同方法得到的疲劳寿命的值.

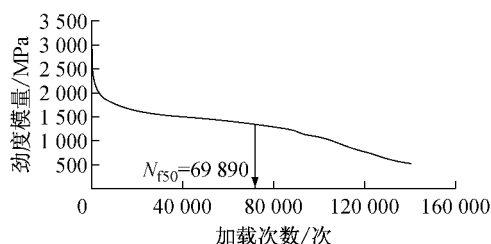


图 3 劲度模量随加载次数的变化图

Fig. 3 Chart of statistical relationship between stiffness and load cycles

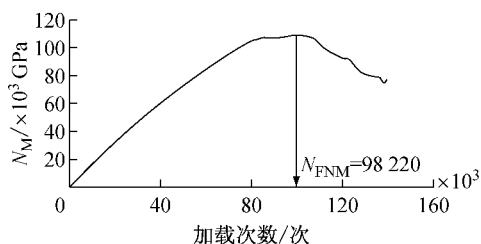


图 4 $N \cdot M$ 随着加载次数的变化图

Fig. 4 Chart of statistical relationship between $N \cdot M$ and load cycles

由试验数据可知,此试件的初始劲度为 2 744 MPa,则劲度模量 S_0 的 50% 即 1 372 MPa,因此,可查此图可以看到当加载次数达到 69 890 次时,小梁的劲度模量下降到 1 372 MPa,即 $N_{f50} = 69\ 890$.

由图 4 可知, N_M 达到最大时的加载次数为 98 220,因此根据定义,此试件的疲劳寿命 $N_{fNM} = 98\ 220$. 虽然在 N_M 的公式中提出了初始劲度模量选取第 50 次的劲度模量, S_0 是常数, N_M 出现最大值时的 N_i 与 S_0 无关,因而不受 S_0 取值的影响.

需要特别说明的是:

(1) N_{f50} 法是以衰减至 50% 的初始劲度模量时的加载次数作为疲劳试验的判断标准, N_{fNM} 法中达到最高 N_M 时 S_i 通常衰减到了初始劲度模量的 30%~15% 之间,因此进行加载试验进行的过程更长. 因此,对同一沥青混合料,采用 N_{fNM} 法测得的疲劳寿命会高于 N_{f50} 法测得的疲劳寿命;

(2) 在研究过程中发现,常规基质沥青混合料在试验过程中的自愈合能力很弱,且基质沥青混合料 N_{f50} 法的数据的变异系数比 N_{fNM} 法的变异系数小,此前的研究经验均采用 N_{f50} 法,故本文均采用 N_{f50} 作为基质沥青混合料疲劳寿命判断标准;

(3) 改性沥青由于改性剂的存在有着比基质沥青更好的韧性与弹性,在发生 50% 的初始劲度模量减少时,混合料通常远未发生疲劳破坏. 同时,改性沥青混合料初始劲度模量较大,而劲度模量越高越会带来更大的误差,因此第 50 次的劲度模量值变化较大,这是导致改性沥青混合料 N_{f50} 数据离散性较大的原因. 相对而言,与初始劲度模量无关的 N_{fNM} 变异系数较小,相对稳定,可信度更高. 综上所述, N_{fNM} 法更能客观反映改性沥青混合料的疲劳性能,为此采用 N_{fNM} 作为改性沥青混合料疲劳寿命判断标准.

在设计过程中,究竟选取何种沥青、沥青用量、级配和空隙率,是一个结合力学设计与实践经验综合问题. 不同的沥青混合料的路用性能差异巨大,为贴合环境与交通量的需要因地制宜进行选择材料是混合料设计中的基础^[14].

1.3.3 自愈合环境与条件的设定

沥青混合料具有自愈合性能,这种自愈合能力体现在,经过一定的环境与条件给予其充分的恢复,进行第二次疲劳试验时能够达到的疲劳次数能够达到上一次疲劳次数的百分比,采用公式表达为自愈合能力 $H = (N_{f2}/N_{f1}) \times 100\%$. 第一次进行的疲劳试验为 N_{f1} ,自愈合后进行的疲劳试验为 N_{f2} , N_{f2} 与 N_{f1} 之和即为考虑自愈合后的疲劳寿命 N_f , N_{f2} 与 N_{f1} 的比值做百分率处理后作为自愈合能力 $H, \%$.

根据研究者在先期的研究^[9] 中发现,内因方面,疲劳自愈合效率与沥青用量呈正比,与破坏程度和空隙率呈反比;外因方面,疲劳自愈合效率与自愈合时间成正比,与应变大小呈反比,与自愈合温度和荷载强度的关系是当自愈合温度和荷载强度分别为 50 $^{\circ}\text{C}$ 和 5 kPa 时最佳(橡胶沥青为 60 $^{\circ}\text{C}$ 和 5 kPa),设定此条件特定的标准自愈合环境.

本次研究沿用此前研究成果的标准自愈合环

境,将 10 种改性沥青混合料小梁试件在经过第一次疲劳试验后进行预压的保温处理,而后进行第二次疲劳试验,再将考虑自愈合后的疲劳性能的各种小梁进行多控制目标全方位的对比,对比相同设计下几种沥青的优劣,旨在将大量的疲劳试验进行归纳和概括,为未来研究和工程实践提供较为明晰的脉络。

2 疲劳性能对比与分级

2.1 相同沥青用量下的疲劳性能

混合料的疲劳性能主要由沥青的粘结性能所贡献,而沥青用量又是决定混合料成本的关键,对比相同沥青用量下的混合料的疲劳性能,有助于最为直观地呈现不同沥青混合料的优劣。所有的混合料均

采用 5%的沥青用量,其他未进行过疲劳试验的沥青混合料进行新试验,每种混合料切割成 4 根小梁试件,平行试验 3 次,取变异小的 2 次作为试验最终值,1 根用于进行最大拉应变试验。自愈合后的疲劳试验是在旧梁放置于 50 ℃环境下保温 4 h 再静置于 15 ℃室温下 24 h 后进行。两次疲劳试验应变量均为 1 000 με,后续试验均同此方案。

其中所有的 TB 及其复合改性沥青均采用 15%的胶粉掺量,改性剂的掺量为 SBS3%,岩沥青 10%,PE4%;PE-AC13 采用干法工艺,PE 占混合料的 0.5%,岩沥青-AC13 中岩沥青占改性沥青的 10%。值得一提的是 AC13 和硬沥青-AC13 由于是基质沥青,采用 N_{f50} 法进行评价,其余的改性沥青均采用 N_{fNM} 法进行评价,以下试验均如此。试验结果如表 2 所示。

表 2 5%沥青用量下的小梁疲劳试验数据

Tab.2 Results of 4PB fatigue tests of the studied mixtures at 5% asphalt content

种类	空隙率/%	能承受最大 应变量/μϵ	初始劲度 模量/MPa	恢复后劲度 模量/MPa	N_{f1} /次	N_{f2} /次	自愈合 能力/%	N_f /次
AC-13	3.7	8 722	3 219	1 382	12 550	4 860	38.7	17 410
			3 327	1 228	11 700	2 610	22.3	14 310
SBS-AC13	3.7	28 340	5 147	2 018	185 920	63 800	34.3	249 730
			5 316	2 382	199 170	88 750	44.6	287 920
ARAC-13	6.8	37 233	4 856	1 866	110 330	51 810	47.0	162 150
			4 761	1 794	106 740	43 610	40.9	150 350
TB-AC13	3.8	17 339	3 242	407	103 490	35 500	34.3	138 990
			3 349	744	88 790	35 760	40.3	124 550
TB+SBS	3.2	29 939	4 390	1 504	159 140	55 620	35.0	214 770
			4 707	1 750	152 610	50 500	33.1	203 110
TB+岩沥青	3.6	12 682	5 707	1 623	148 700	43 640	29.3	192 340
			5 335	1 404	124 010	37 630	30.3	161 640
TB+PE	4.1	13 129	7 309	1 586	106 940	32 080	30.0	139 020
			7 255	1 769	91 460	26 780	29.3	118 240
PE-AC13	4.6	12 120	7 362	1 638	22 760	5 160	22.7	27 920
			8 895	1 342	20 510	5 040	24.6	25 550
岩沥青-AC13	5.3	8 211	8 771	2 011	38 620	7 970	20.6	46 590
			7 700	1 782	51 190	10 700	20.9	61 890
硬沥青-AC13	4.2	7 252	8 789	2 723	6 600	1 170	17.7	7 770
			10 040	4 371	13 910	1 560	11.2	15 470

在疲劳试验前,进行一次最大弯拉应变量试验。夹具与方法均与疲劳试验完全相同,仅进行单次破坏。

$$\epsilon = \frac{12 \times \delta \times h}{3 \times L^2 - 4 \times a^2}$$

式中:ε 为最大拉应变;δ 为梁中心最大应变;a 为相邻夹头中间距离,一般为 0.119 m;L 为梁的跨距,一般为 0.357 m。

取表 3 中的 N_{f1} 和 N_f 的均值作图 5。

由试验结果可知,相同沥青用量下,ARAC-13 具有最高的自愈合能力,其次是 TB-AC13、SBS 改性沥青混合料以及 TB+SBS 复合改性沥青混合料。由图 5 可知,SBS-AC13 的疲劳寿命最佳,以下是 TB

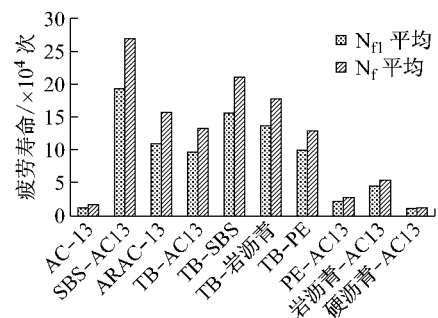


图 5 5%沥青用量下各种沥青混合料的疲劳次数

Fig.5 Fatigue performance in 5% asphalt content

+SBS,TB+岩沥青和 ARAC-13 等;传统的 SBS 改性沥青和橡胶沥青都既有较高的疲劳性能,也有较好的自愈合性能,所有的 TB 类的复合改性沥青亦

是如此。

可以发现,同在 5%的沥青用量下,考虑了自愈合与不考虑自愈合的疲劳性能排序主要区别在于橡胶沥青 ARAC-13 和 TB-AC13 的变化,考虑了自愈合之后这两者均有排序上的提升,这说明胶粉改性类沥青存在着较明显的自愈合现象,在考虑此类混合料疲劳性能时需考虑其自愈合能力,否则会导致设计过于保守或沥青用量超高. 在相同的 5%沥青用量下的疲劳性能排序为: SBS-AC13>TB+SBS>ARAC-13>TB+岩沥青>TB-AC13>TB+PE>岩沥青-AC13>PE-AC13>AC-13>硬沥青-AC13.

2.2 相同体积设计目标的疲劳性能

我国的沥青混合料设计方法的核心是在某种级配中以固定的空隙率寻找到合适的沥青用量,再进

行各种性能检测. 若疲劳性能是需要考虑的指标之一,在设计中究竟选用何种沥青混合料最合适,有必要进行在目标空隙率下的疲劳性能检测,以各自适宜的目标空隙率进行混合料设计,对比在各自最佳沥青用量下的疲劳性能.

所用沥青混合料均需事先成型马歇尔试件,计算空隙率后进行试碾压,试碾压是一个重复且难以控制的过程,每种沥青混合料的碾压次数并不完全相同,试验小梁均重新专门制作,空隙率均控制在目标空隙率左右,误差在±0.1%以内. 试验均在1 000 με 的应变量下进行. 值得一提的是: 橡胶沥青 ARAC-13 常用目标空隙率为 5.5%,其余均采用了 4.0%的常规目标空隙率进行设计. 试验结果见表 3 所示.

表 3 目标空隙率设计下的小梁疲劳试验结果

Tab.3 Results of fatigue tests of the studied mixtures at the same void ratio

小梁名称	空隙率/%	能承受最大应变量/μϵ	最佳沥青用量/%	初始劲度模量/MPa	恢复后劲度模量/MPa	N_{fi} /次	N_{f2} /次	自愈合能力/%	N_{fi} /次
AC-13	4.0	7 655	4.7	4 272	1 588	4 280	1 400	32.7	5 680
				4 459	1 412	5 320	820	15.4	6 140
SBS-AC13	4.0	25 612	4.8	4 759	2 320	161 640	53 300	33.4	215 440
				5 089	2 738	167 510	63 680	38.2	230 870
ARAC-13	5.5	46 426	8.1	3 135	2 145	528 340	372 730	70.5	901 070
				3 462	2 062	468 200	337 390	72.1	805 590
TB-AC13	4.0	14 672	5.0	3 890	468	91 720	46 270	50.4	137 990
				3 576	855	87 600	41 290	47.1	128 890
TB+SBS	4.0	22 145	4.9	3 777	1 729	475 780	113 840	23.9	589 620
				3 821	2 012	531 300	150 300	28.3	681 600
TB+岩沥青	4.0	9 872	5.0	5 242	1 866	157 400	71 860	45.7	229 260
				4 856	1 614	134 130	48 510	36.2	182 640
TB+PE	4.0	13 413	4.7	5 512	1 823	93 890	21 230	22.6	115 120
				5 581	2 033	82 930	15 500	18.7	98 430
PE-AC13	4.0	13 402	4.7	5 663	1 773	43 920	6 200	14.1	50 120
				5 892	1 556	28 820	4 740	16.4	33 560
岩沥青-AC13	4.0	11 043	4.4	6 123	2 301	53 400	12 340	23.1	65 740
				6 422	2 522	77 690	8 430	10.9	86 120
硬沥青-AC13	4.0	8 310	4.7	6 761	1 023	6 300	450	7.1	6 750
				7 723	883	6 730	580	8.6	7 310

将 N_{fi} 和 N_f 取均值作图 6.

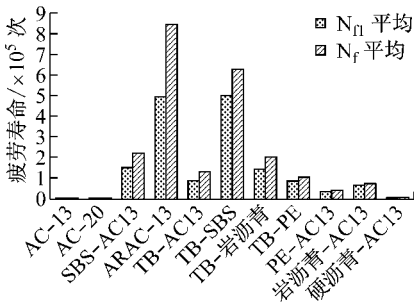


图 6 目标空隙率设计下各种沥青混合料的疲劳次数

Fig.6 Fatigue performances in the target void ratio design

从图 6 可看出,ARAC-13 仍然具有最高的自愈

合能力,以下是 TB+SBS、SBS-AC13 和 TB-岩沥青 AC-13. 然而对比不考虑自愈合的排序和考虑自愈合后的排序,橡胶沥青的排序变化最为明显,胶粉改性类沥青混合料具有较高的自愈合能力. 相同体积设计目标下,疲劳性能排序为: ARAC-13>TB+SBS>SBS-AC13>TB+岩沥青>TB-AC13>TB+PE>岩沥青 AC13>PE-AC13>硬沥青 AC13>AC-13.

总体而言,传统的 SBS 改性沥青和橡胶沥青都既有较高的疲劳性能,也有较好的自愈合性能,TB 类的复合改性亦是如此. 这里 ARAC-13 体现出了它的骨架密实结果的先天优势,可以吸纳更多的沥青以达到更高的疲劳寿命,而且由于胶粉的存在,使得

其自愈合能力优异,进一步加大了疲劳寿命. TB 沥青混合料在不做任何处理的时候与基质沥青相差不大,仅仅由于判断标准的不同导致 TB-AC13 的疲劳寿命较基质沥青多出许多,但进行复合改性后尤其是加入适量的 SBS 后效果将有极大的改善,这说明 TB 胶粉改性沥青与橡胶沥青是两者截然不同的沥青,且 TB 沥青不适合单独使用,需要进行复合改性.

然而用目标体积(即空隙率)指标的方法,其设计初衷是基于混合料的高温性能的考虑,设计过程中需验证马歇尔强度和高温车辙^[12],仅通过疲劳性能的指标,并不能保证此混合料性能满足我国规范的要求,因此本节设计与疲劳试验相同的沥青混合料,成型车辙试件,完成 60 ℃下的车辙试验,以对相同体积设计目标的对比进行全面的对比,试验结果如表 4 所示.

表 4 相同体积设计目标的高温车辙试验结果

Tab. 4 High-temperature rutting test results with the same goals for volume design

混合料名称	沥青用量/%	永久变形/mm	动稳定度/次·mm ⁻¹	动稳定度均值/次·mm ⁻¹
AC-13	4.7	4.53	1 246	1 183
		4.62	1 121	
SBS-AC13	4.8	3.76	6 850	7 330
		3.44	7 810	
ARAC-13	8.1	3.72	7 563	6 708
		3.98	5 854	
TB-AC13	5.0	6.88	851	784
		7.12	718	
TB+SBS	4.9	4.11	5 231	5 180
		4.26	5 130	
TB+岩沥青	5.1	4.20	5 083	5 902
		3.94	6 722	
TB+PE	4.7	4.42	2 623	2 678
		4.66	2 733	
PE-AC13	4.7	2.98	9 735	11 077
		2.55	12 420	
岩沥青-AC13	4.4	2.73	7 611	6 446
		2.45	5 282	
硬沥青-AC13	4.7	2.34	14 452	11 662
		3.20	8 872	

值得一提的是, TB-AC13 是未经过复合改性的 TB 沥青直接拌合石料的混合料,而 TB 沥青是经过高温等一系列物理和化学工艺溶解的胶粉改性沥青,其沥青结构发生了变化,表观检测的结果是此类沥青的软化点较低,针入度较高,高温性能较差,由试验结果也可看出,在无复合改性的情况下单独使用 TB 沥青是无法满足混合料的高温性能的.

将表 4 中的 N_f 的均值和表 5 中的动稳定度均值分别取以 10 为底的对数,作于同轴图中,考虑到疲劳性能和高温性能在混合料设计上的矛盾特性,将图中疲劳性能取正值,高温性能取负值以便于观

察,如图 7 所示.

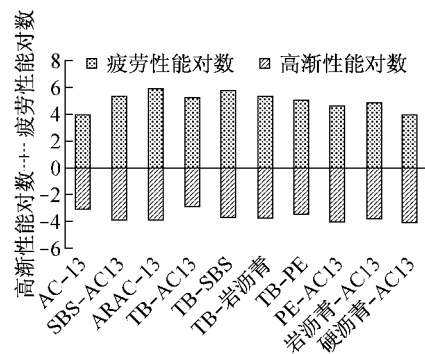


图 7 按相同目标设计下的不同混合料疲劳与高温性能对数图

Fig. 7 Fatigue and high-temperature performance logarithmic chart

将图 7 中的疲劳与高温对数值的绝对值相加,可以得到全范围设计性能幅值.从评价的过程可看出,此全范围设计性能幅值的大小决定了混合料适用的工况范围——路面的层位、气温的高低、交通量的不同繁重程度等,也决定了混合料在设计过程中的灵活程度.以目标设计为原点,上调或下调混合料的空隙率、沥青用量以达到不同的疲劳或高温性能要求.性能幅值最大的是 ARAC-13,其次是 TB+SBS,第三是 SBS-AC13.

根据试验结果,将上述 10 种沥青混合料进行疲劳性能分级.试验结果如表 5 所示.

表 5 相同设计目标下的不同沥青混合料疲劳性能分级

Tab. 5 Fatigue performance grades with the same volume design target

疲劳性能分级	lg N_f 范围	沥青混合料	平均动稳定度/次·mm ⁻¹
A	5.8-5.9	ARAC-13	6 708
		TB+SBS	5 180
B	5.3-5.8	SBS-AC13	7 330
		TB+岩沥青	5 902
C	5.0-5.3	TB-AC13	784
		TB+PE	2 678
D	4.6-5.0	PE-AC13	11 077
		岩沥青-AC13	6 446
E	≤4.6	硬沥青-AC13	11 662
		AC-13	1 183

2.3 相同高温性能的疲劳性能分级

考虑到柔性路面在高温和超载的双重作用下最主要的破坏仍表现为车辙破坏,我国施工规范对于车辙试验的高温性能提出了较为严格的要求,而且疲劳性能与高温性能在相同沥青用量下为一对矛盾,若高温性能不能达标,疲劳性能的对比将失去意义,故在研究疲劳性能的同时需兼顾高温性能.随着混合料种类和改性方法的增多,且根据路面结构和

车辙理论,不同深度的沥青层对高温性能和疲劳性能的要求不一^[12],但规范^[12]中的动稳定度要求较为宽泛,为此将本文对混合料高温车辙进行更为细致的分级,以满足不同层位的动稳定度要求.在满足高温性能的前提下,计算荷载所带来的弯拉应变,进一步根据轴载次数计算可承受的疲劳次数,可选出满

足要求的沥青混合料类型即结合料用量,基于此理念在本节中提出高温和疲劳性能的双向选择分级表.沿用表 5 的数据,并进行了补充试验.结果如表 6 所示.研究所涉及的沥青用量多集中在 4%~7%较为典型的区域,可为施工与设计提供参考.

表 6 本文所涉及沥青混合料的高温性能分级

Tab.6 Fatigue performance of mixtures in each high-temperature performance grade							
高温性能分级	动稳定度范围/ 次·mm ⁻¹	沥青混合料类型 及其沥青用量	疲劳寿命/ N _{f1} ·次 ⁻¹	疲劳寿命/ N _{f2} ·次 ⁻¹	考虑自愈合后 疲劳寿命/ N _f ·次 ⁻¹	log N _f ·次 ⁻¹	疲劳性能 分级
A+	≥10 000	PEAC13-5%	42 390	8 860	51 250	4.710	D
		PEAC13-4%	31 200	7 520	38 720	4.588	E
A	6 000-10 000	TB+SBS-4%	312 930	80 810	390 940	5.593	C
		TB+PE-4%	65 750	17 740	83 490	4.922	D
B	2 800-6 000	TB+SBS-5%	316 280	207 570	523 850	5.719	B
		ARAC-7%	229 120	143 710	372 830	5.572	B
		SBSAC13-5%	172 530	93 810	266 340	5.425	B
		TB+PE-5%	121 630	52 260	173 890	5.240	C
		岩沥青 AC13-5%	80 290	10 970	91 260	4.960	D
		SBSAC13-4%	60 530	22 380	82 910	4.919	D
		岩沥青 AC13-4%	50 280	8 610	58 890	4.767	D
		硬沥青 AC13-4%	4 620	0	4 620	3.665	E
C	1 000-2 800	ARAC-9%	>10 ⁶	232 160	>10 ⁶	>6	A+
		SBSAC13-7%	312 390	290 440	602 830	5.780	B
		TB+SBS-7%	302 830	153 440	456 270	5.659	B
		TB+岩-5%	148 780	54 960	203 740	5.309	B
		TBAC13-4.8%	83 280	58 040	141 320	5.150	C
		TBAC13-3.3%	27 370	11 110	38 480	4.585	E
		硬沥青 AC13-5%	7 120	1 520	8 640	3.915	E
		AC13-4%	1 650	0	1 650	3.217	E
D	300-1 000	ARAC-11%	>10 ⁶	>10 ⁶	>10 ⁶	>6	A+
		TB+PE-7%	197 280	81 110	278 390	5.445	B
		TBAC13-6.3%	154 237	44 603	198 840	5.299	C
		硬沥青 AC13-7%	20 370	8 360	28 730	4.458	E
		AC13-5.5%	5 124	3 696	8 820	3.945	E
E	≤300	AC13-7%	145 610	100 880	246 490	5.392	B
		AC13-6%	29 167	5 393	34 560	4.539	E

为便于直观观察,将表 7 中的分级进行具体取值后绘制分区散点图,如图 8 所示.

图 8 中横坐标虚线处为高温分级的指标,由左至右分别为 300,1 000,2 800,6 000 和 10 000,纵坐标虚线处为疲劳分级的指标,由下至上分别为 4.6,5.0,5.3,5.8 和 5.9.散点图中越接近右上区域的沥青混合料的高温 and 疲劳性能越突出.沥青用量可在具体的设计中具体考虑,两种性能需要在实际工程中做出合理的取舍.在设计混合料的过程中,可依据本表中推荐的级别,在某个固定沥青用量上下微调,在满足空隙率要求下预判高温和疲劳性能的级别,可以迅速确定混合料某层混合料的沥青种类和沥青用量.

纵观所涉及的沥青用量范围,在各自的高温性能分级情况下,混合料疲劳性能排序为:高温 A 级(DS:≥6 000):TB+SBS,TB+PE 和 PE;高温 B 级(DS:2 800-6 000):ARAC,SBS,岩沥青和硬沥青;高温 C 级(DS:1 000-2 800):TB+岩沥青,TB 和基

质沥青;高温 D 级(DS:300-1 000):高沥青用量的 ARAC、高沥青用量的 TB,高温 E 级(DS≤300):高沥青用量的基质沥青.

3 结论

(1) SBS 改性沥青和橡胶沥青兼具较好的疲劳性能和自愈合性能;复合改性的 TB 沥青混合料具有较好的自愈合性能.建议在评价此三类沥青混合料的疲劳性能时需考虑其自愈合能力,否则会导致设计过于保守或沥青用量超高.

(2) 同在 5% 沥青用量下的疲劳性能排序为: SBS-AC13>TB+SBS>ARAC-13>TB+岩沥青>TB-AC13>TB+PE>岩沥青-AC13>PE-AC13>AC-13>硬沥青-AC13.

(3) 相同体积设计目标下,疲劳性能排序为: ARAC-13>TB+SBS>SBS-AC13>TB+岩沥青>TB-AC13>TB+PE>岩沥青 AC13>PE-AC13>

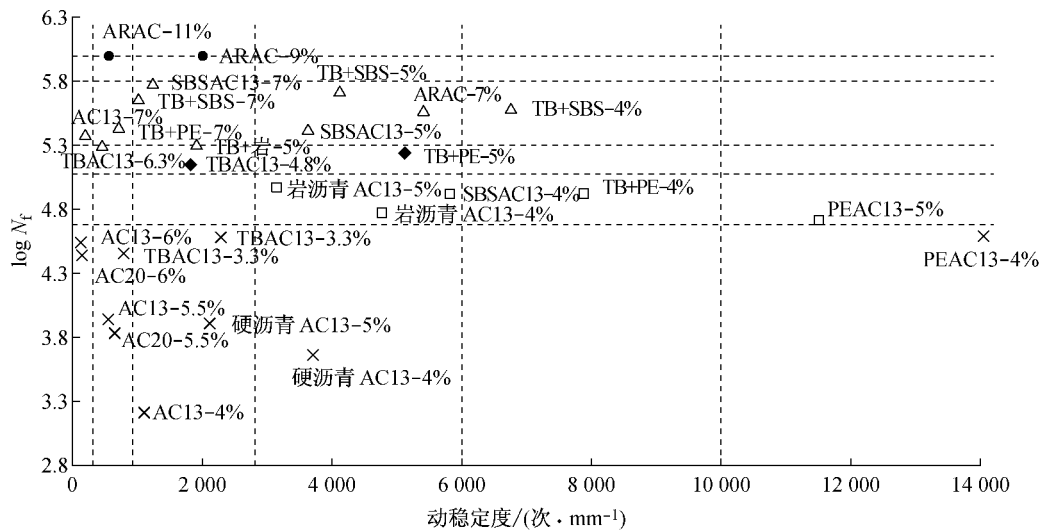


图8 沥青混合料的疲劳性能对数值与高温性能的分区散点图

Fig.8 Partition scatterplot of the logarithm of fatigue performance and high-temperature performance

硬沥青 AC13>AC13;相同体积目标设计下可做全范围设计性能幅值图(图5),可依据此图为施工寻求一个有效的设计参考,通过上调或下调混合料的空隙率、沥青用量以满足不同的疲劳或高温性能要求。

(4) 相同高温性能分级情况下,混合料疲劳性能排序为:高温 A 级(DS:≥6 000):TB+SBS,TB+PE 和 PE;高温 B 级(DS:2 800-6 000):ARAC,SBS,岩沥青和硬沥青,高温 C 级(DS:1 000-2 800):TB+岩沥青,TB 和基质沥青;高温 D 级(DS:300-1 000):高沥青用量的 ARAC 和高沥青用量的 TB;高温 E 级(DS≤300):高沥青用量的基质沥青。根据试验结果绘制了高温性能和疲劳性能的散点图(见图6),可据图在实际工程的设计过程中做取舍。

参考文献:

- [1] Epps J A, Monismith C L. Fatigue of asphalt concrete mixtures-summary of existing information[C]// ASTM STP 508: Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures. Coshocken: American Society for Testing and Materials,1972: 19-45.
- [2] Rowe G M, Boulidin M G. Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures[C]// Proceedings of 2nd Euro Asphalt and Euro Bitumen Congress. Barcelona: [s.n],2000: 754-763.
- [3] ASTM. ASTM-D7460-10 Standard test method for determining fatigue failure of compacted asphalt concrete subjected to repeated flexural bending[S]. [S.l.]:ASTM,2010.
- [4] Bazin P, Saunier J. Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes[C]// International Conference on Structural Design Asphalt Pavements. [S.l.]:TRB,1967: 438-451.
- [5] Rashid K, Abu A R, Masoud K, *et al.* A micro-damage healing model that improves prediction of fatigue life in asphalt mixes[J]. International Journal of Engineering Science, 2010(48): 966.
- [6] Álvaro García. Self-healing of open cracks in asphalt mastic[J]. Fuel, 2012(93): 264.
- [7] Bhasin A, Little D N, Bommaravaram R, *et al.* A framework to quantify the effect of healing in bituminous materials using material properties[J]. Road Materials and Pavement Design, 2008(Supplement 1):219.
- [8] Bhasin A, Palvadi S, Little D N. Influence of aging and temperature on intrinsic healing of asphalt binders[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2011,47(2207):70.
- [9] 黄明,汪翔,黄卫东. 橡胶沥青混合料疲劳性能的自愈合影响因素研究[J]. 中国公路学报,2013,4(26): 16.
HUANG Ming, WANG Xiang, HUANG Weidong. Analysis of influencing factors for self-healing of fatigue performance of asphalt rubber mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013,4(26): 16.
- [10] Hajj E Y, Sebaaly P E, Hitti E, *et al.* Performance evaluation of terminal blend tire rubber HMA and WMA mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2011, 80(4): 665.
- [11] Arizona Department of Transportation. Standard specifications for road & bridge construction[S]. Phoenix: Arizona Department of Transportation Engineering Records Section, 2000.
- [12] 交通部公路科学研究院. JTJ F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTJ F40-2004 Technical specifications for construction of highway asphalt pavements[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [13] 交通部公路科学研究院. JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E20-2011 Standard test method of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press,2011.
- [14] 姚祖康. 对我国沥青路面现行设计指标的评述[J]. 公路, 2003(2):43.
YAO Zukang. A review on design criteria of asphalt pavements[J]. Highway, 2003(2):43.