

改性沥青混凝土混合料的回弹性能

萨阿德·伊萨·萨萨姆^{*}, 萨拉·阿里·贾西姆
伊拉克 巴格达 巴格达大学工程学院土木工程系

摘要: 沥青混凝土路面设计为在寒冷天气条件下在荷载作用下表现出弹性行为, 在炎热天气条件下表现出了弹性、塑性和粘性行为的组合。路面破损通常始于荷载重复导致的微裂缝的开始, 而这些裂缝在反复荷载、外部或内部加热以及环境温度下的休息期的条件下, 可以在缓慢的过程中自行愈合。本工作的目的是评估使用三种聚合物添加剂(如淀粉-丁二烯-苯乙烯(SBS)、低密度聚乙烯(LDPE)和废轮胎橡胶)的改性沥青混凝土的弹性性能。制备了长度 381.0 mm、宽度 76.2 mm、厚度 76.2 mm 的梁试样, 具有最佳沥青含量要求, 以及超过和低于最佳沥青含量的额外 0.5% 沥青。梁试样在反复弯曲应力下进行测试。25° C 时施加的应力水平为 138 kPa。加载周期包括 0.1 秒加载, 然后是 0.9 秒的休息期。使用气动重复加载系统(RPLS)进行 660 次重复加载试验, 以允许微裂纹的产生。在规定的加载循环后, 停止试验, 将试样从 PRLS 试验室中取出, 并在 60° C 的环境下在烘箱中储存两小时, 以允许可能的微裂纹愈合。然后对试样进行另一个加载循环。通过 LVDT 捕捉永久性、总变形和弹性变形。计算弹性模量, 并在各种条件下进行比较。试验结果表明, 所使用的聚合物添加剂和微裂缝愈合过程对沥青混凝土的弹性模量和变形变量有积极影响。

关键词: 沥青混凝土; 聚合物添加剂; 弹性模量; 重复荷载; 微带线

Resilient Behavior of Modified Asphalt Concrete Mixture

Saad Issa Sarsam^{*}, Sara Ali Jasim

Department of Civil Engineering, College of Engineering, University of Baghdad, Baghdad, Iraq

Abstract: Asphalt concrete pavement is designed to exhibit elastic behavior under loading at cold weather condition and a combination of elastic, plastic and viscous behavior at hot weather condition. Distress of the pavement usually starts with initiation of micro cracking due to load repetition, while such cracks can heal by themselves in slow process under repeated loading, external or internal heating, and provision of rest period at ambient temperature. The aim of this work was to assess the resilient behavior of modified asphalt concrete using three types of polymer additives such as styrene-butadiene-styrene (SBS), low density polyethylene (LDPE), and scrap tire rubber. Beam specimens of 381.0 mm length, 76.2 mm width, and 76.2mm thickness have been prepared with optimum asphalt content requirement and with extra 0.5% asphalt above and below the optimum. Beam specimens were tested under repeated flexure stress. The applied stress level was 138 kPa at 25°C. The loading cycle consist of 0.1 second loading application followed by 0.9 seconds of rest period. The test was conducted for 660 load repetitions using the Pneumatic repeated load system (RPLS) to allow for the initiation of micro cracks. After the specified loading cycles, the test was stopped and the Specimens have been withdrawn from the testing chamber of PRLS and stored in the oven for two hours at 60°C environment to allow for possible micro crack healing. The specimens were then subjected to another loading cycle. Permanent, total and resilient deformations were captured through LVDT. The resilient modulus was calculated and compared among various conditions. Test results showed that the implemented polymer additives and the process of micro crack healing have positive influence on resilient modulus and deformation variables of asphalt concrete.

Keywords: Asphalt concrete; Polymer additives; Resilient modulus; Repeated load; Microstrain

1. 引言

沥青水泥混合料是一种粘弹性材料, 其荷载施加速率和温度对其性能有很大影响。沥青混凝土路面的质量可以通过其弹性特性(释放荷载后保持其原始形状的能

力)来评估。众所周知, 在路面施工中使用聚合物添加剂可以使传统沥青混凝土具有更好的工程财产以及耐久性沥青混凝土路面。沥青混凝土混合料的弹性特性, 如弹性变形和弹性模量, 可描述为施加的偏应力与可恢复

应变或弹性应变的比率, 被视为柔性路面设计的基本参数。弹性特性是衡量材料对荷载和变形的响应^[1]。通常, 较高的弹性模量表示较大的抗变形能力, 而较高的弹性变形表示

人行道弹性模量可在 25° C 的中等温度和 (138Kpa) 的应力水平下测定^[2]。^[3] 研究了添加剂和改性剂, 如液体抗剥离剂 (LAS)、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SBS)、聚磷酸 (PPA) 和熟石灰, 以评估聚合物改性沥青在路面中的影响。聚合物改性粘合剂的使用可以显著减少沥青混凝土混合物中的车辙。如果在交通量较大的低交通量道路上使用聚合物改性沥青, 预计路面寿命会增加^[4]。增加沥青的刚度也可能增加沥青的动态刚度。这将提高材料的荷载分散能力, 提高结构强度, 延长路面的预期使用寿命。或者, 可以实现相同的结构强度, 但使用较薄的层^[5]。在^[6]进行的一项研究中, 进行了实验室试验, 以评估与纯沥青相比, 聚合物改性沥青 PMB 路面的长期现场性能。现场样品取自沥青混凝土路面 (含和不含 PMB), 同时制备了沥青混凝土实验室样品 (含纯沥青和 PMB)。然后在 50° C 的温度下在车轮跟踪装置中测试这些样品。研究表明, 与含有普通沥青的沥青混合物相比, 聚合物改性粘合剂的使用提高了沥青混合料的抗变形性。循环动态挠度是沥青混凝土试验剖面, 最接近模拟沥青路面上交通荷载作用下材料行为的真实条件^[7]。为了提高沥青的工程财产, 经常使用各种聚合物对沥青进行改性。最成功的聚合物改性剂是热塑性弹性体, 尤其是苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SBS)^[8]。最常见的塑性沥青改性剂是聚乙烯和聚丙烯。根据^[9]研究中获得的结果, 不应取消由反应性乙烯酯聚合物 RET 和聚磷酸 PPA 改性的粘合剂在高温下的性能竞争资格。结果表明, 这些材料在低温下具有足够的硬度, 并且在长时间老化后可以显示出较小的变形。聚合物对沥青水泥结构的影响已证明会增加粘度, 降低粘合剂的热敏感性, 同时也会增加对永久变形和疲劳的抵抗力^[10-13]。本工作的目的是评估聚合物添加剂 (SBS、LDPE 和橡胶) 改性沥青混凝土在反复弯曲应力下的弹性行为。

2. 材料和方法

2.1 沥青水泥

本次调查采用了从 Daura 炼油厂获得的 44 沥青水泥的渗透等级。表 1 显示了沥青水泥的物理财产。

Property of asphalt cement as per ASTM [11]	Result	Unit	SCRB Specification [12]
Penetration (25°C, 100g, 5 sec) ASTM D5-97	44	1/10mm	40-50
Softening Point (Ring & Ball) ASTM D5-36	48.9	°C	50-60
Ductility (25°C, 5cm/min) ASTM D113-07	120	cm	>100
Kinematic viscosity at 135°C ASTM D2170	365	C. St	(1.01-1.05)
Specific gravity at 25°C ASTM D3-70	1.04		
After Thin-Film Oven test as per ASTM D1754			
Retained penetration of original, % D946	60	%	>55%
Ductility at 25°C, 5 cm/min	75	cm	>25
Loss in weight (163°C, 50g, 5h) ASTM D1754	0.34	%	<0.75

表 1. 沥青水泥的物理财产。

2.2 粗骨料和细骨料

破碎的粗骨料从 Al Nibae 采石场获得, 并在本工程中实施。它由坚硬、坚固、耐用的部件组成。根据 SCR B R/9,^[12] 规范, 粗骨料的级配是粘合剂层施工的

典型级配, 最大粒径范围为 19.0 mm, 并保留在 (4.75 mm) 筛上。细骨料也从 Al Nibae 采石场获得。细骨料级配通过 4.75mm, 保持在 0.075mm。细骨料由坚硬的颗粒组成, 不含粘土、壤土或其他有害物质。粗骨料和细骨料的物理财产如表 2 所示。

Property as per ASTM [11]	Course Aggregate	Fine Aggregate
Bulk Specific Gravity (ASTM C127 and C128)	2.680	2.630
Percent Water Absorption (ASTM C127 and C128)	0.423	0.542
Percent Weir (Los-Angeles Abrasion) (ASTM C131)	21.7	

表 2. Al-nibae 粗骨料和细骨料的物理财产。

2.3. 矿物填料

波特兰水泥已被用作填料。它完全干燥, 没有结块或细颗粒聚集。物理财产如表 3 所示。

Physical Properties	
% Passing Sieve No.200 (0.075mm)	98
Specific Surface Area (m ² /kg)	3.55

表 3. 波特兰水泥的物理财产。

2.4. 沥青水泥用聚合物添加剂

在这项工作中使用了三种类型的聚合物添加剂; 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SBS)、低密度聚乙烯 (LDPE) 和废轮胎橡胶。三种类型的改性沥青水泥粘合剂是在实验室制造的。生产工艺和财产的信息已在其他地方发布^[13]。图 1 显示了实施的聚合物添加剂。

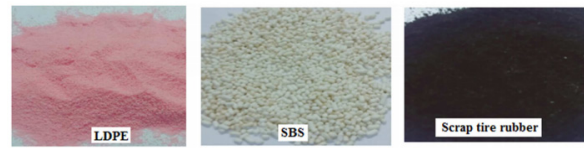


图 1. 研究中使用的聚合物添加剂。

2.5 结合层的选择总体骨料级配

本研究选择的总体密实级配符合 SCR B R/9,^[12] 规范, 该规范适用于通常用于骨料最大尺寸为 (19mm) 的结合层的热拌沥青路面混合物。图 2: 显示粘结层的级配。

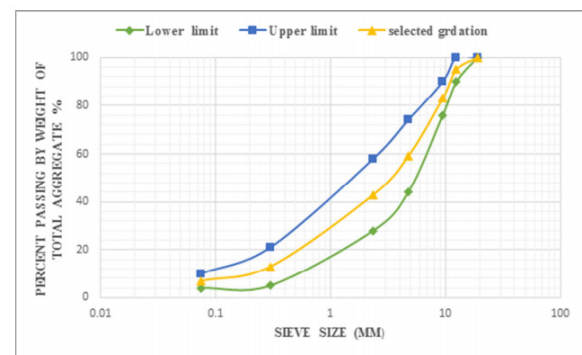


图 2. 结合层骨料的选定级配, scrb^[10]。

2.6. 改性沥青混凝土梁试样的制备

根据 SCR B^[10], 将粘合剂层的骨料混合物加热至 150° C, 同时将纯沥青水泥或改性沥青水泥加热至 160° C, 然后将其添加至骨料中, 并使用机械搅拌机充分搅拌三分钟, 直到沥青充分覆盖骨料表面并获得均匀的混合物。将长 381.0 mm、宽 76.2 mm、高 76.2 mm 的梁模加热至 150° C。使用矿物油略微润滑模具的内表

面,并将一片铝箔放置在模具底部以防止粘连。将热沥青混凝土混合物转移到加热模具中,用加热刮刀均匀铺设并摊铺,然后通过 80 mm 厚的钢板施加 30 kN 的静压。施加的压力在 150° C 下保持三分钟,以达到目标试样的体积密度和厚度。将模具放置 24 小时以在室温下冷却,然后从模具中挤出梁试样。图 3 显示了模具的压实过程,而图 4 显示了铸模。图 5 显示了部分制备的梁试样。梁已按最佳沥青含量要求制备,并在最佳沥青含量之上和之下额外添加 0.5% 的沥青。



图 3. 模具的压实过程。



图 4. 铸造模具。



图 5. 部分制备的梁试样。

2.7. 重复弯曲试验梁试样

在实验室使用气动重复加载系统设备 (PRLS) 进行重复弯曲试验。系统设备具有全面的测试能力,允许进行疲劳和刚度 (弹性模量) 测试。在弯曲梁疲劳试验中,通常使用在所有载荷和反作用点上使用自由旋转梁夹具的四点载荷试验来估计开裂可能性。导致梁失效的循环次数 (疲劳寿命) 通常被视为疲劳开裂可能性的指标。在测试温度 (25° C) 下,将试样放置在系统室内一小时,以使试样内的温度均匀分布,并准确检查其施加荷载的位置。LVDT (线性可变差动变压器) 用于将机械信号 (位移) 转换为电信号,以获得测试结果。固定 LVDT 在试样上的位置,使 LVDT 位移读数接近零。使用 PRLS 在

反复弯曲应力下测试梁试样。25° C 环境下的应力水平为 138 kPa。加载周期包括 0.1 秒加载,然后是 0.9 秒的休息期。使用气动重复加载系统 (RPLS) 进行了 660 次加载重复,以允许可能的微裂纹萌生。在规定的加载循环后,停止试验,将试样从 PRLS 试验室中取出,并在 60° C 的环境下在烘箱中储存两小时,以允许可能的微裂纹愈合。然后对试样进行另一个加载循环。沥青含量测定和目标密度的详细信息见 [14]。

2.8 采用的裂纹修复周期技术

在这项工作中实施的可能的微裂纹愈合技术是通过外部加热过程。在 660 次挠曲载荷重复后,微裂纹开始后,停止试验。如前所述,将试样从 PRLS 试验室中取出,并在 60° C 的烘箱中储存两小时,以允许微裂纹愈合。在 25° C 下对试样进行另一个重复弯曲应力循环,重复 660 次。

测试温度为 (25°C), 而施加的应力为 (138) kPa。图 6 展示了梁的测试设置。

2.9 反复弯曲变形分析

弹性变形和永久变形的测定在以下荷载重复下进行: (1、10、50、100、200、300、400、500 和 660)。通过应用方程 (1) 计算永久应变 (ϵ_p):

$$\epsilon_p = \frac{pd * 10^6}{h} \quad (1)$$

这里:

ϵ_p : 永久微应变 (mm/mm)。

pd: 永久应变千分表读数

h: 试样直径 (mm)。

荷载重复时确定的弹性变形

(50) 至 (100)。弹性应变 (ϵ_r) 和弹性模量

$$\epsilon_r = \frac{rd}{h} \quad (2) \quad \text{下:}$$

这里:

ϵ_r : 垂直弹性应变 (mm/mm)。

rd: 垂直弹性应变千分表读数

$$Mr = \frac{\sigma}{\epsilon_r} \quad (3)$$

这里:

Mr: 弹性模量 (N/mm²)。

σ : 重复径向应力 (N/mm²)。

ϵ_r : 垂直弹性应变 (mm/mm)。



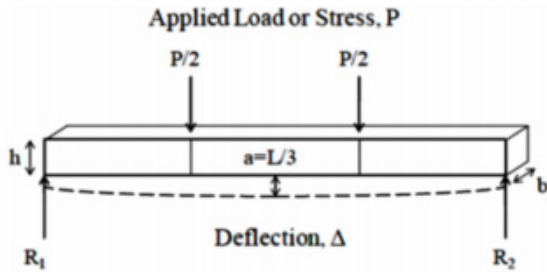


图 6. 梁试样的测试设置。

3. 结果和讨论

3.1. 愈合周期和聚合物添加剂对弹性应变的影响

图 7 显示了愈合周期和聚合物添加剂对沥青混凝土梁试样弹性微应变的影响。弹性应变的行为根据沥青的百分比和添加剂的类型而变化，并且与裂纹愈合过程之前相比，随着愈合而降低。

当沥青含量为 4.3% 时，与对照混合料相比，愈合循环后弹性应变降低 39%。对于最佳沥青含量为 4.8% 的混合料，与对照混合料相比，愈合循环后弹性应变降低 22%。而在 5.3% 沥青含量下，与对照混合料相比，愈合循环后弹性应变的减少为 29%。当使用聚合物添加剂时，可以检测到类似的行为。对于沥青含量为 (4.8、5.3 和 5.8) % 的 LDPE 改性沥青混合料，与对照混合料相比，愈合循环后弹性应变降低了 (6、69 和 72) %。对于沥青含量为 (5.1、5.6 和 6.1) % 的 SBS 改性沥青混合料，与对照混合料相比，在愈合循环后，弹性应变降低了 (11、7 和 0) %。对于沥青含量为 (4.8、5.3 和 5.8) % 的废轮胎橡胶改性沥青混合料，与对照混合物相比，在愈合循环后，弹性应变降低了 (25、30 和 60) %。

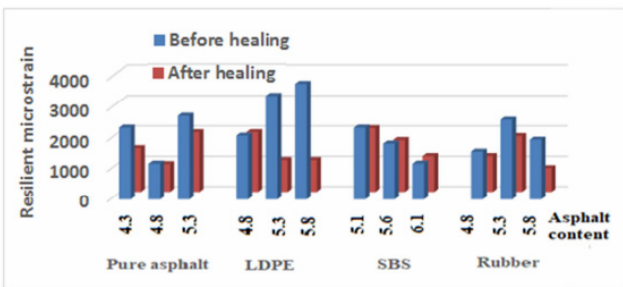


图 7. 裂纹愈合和聚合物添加剂对弹性微应变的影响。

3.2. 聚合物添加剂和裂纹愈合对弹性模量的影响

弹性模量被描述为施加的偏应力与可恢复应变或弹性应变的比率。弹性模量是衡量材料对荷载和变形的响应。通常，模量越高，变形阻力越大。图 8。显示了裂纹愈合和聚合物添加剂对沥青混凝土弹性模量的影响，弹性模量通常在愈合周期后增加。对于沥青含量为 (4.3、4.8 和 5.3) % 的纯沥青混合物，可以注意到，与愈合循环之前的混合物相比，愈合循环之后的弹性模量分别增加了 (64、29、40) %。对于沥青含量为 (4.8、5.3 和 5.8) % 的 LDPE 改性混合物，与愈合循环前的混合物相比，愈合循环后的弹性模量分别增加 (8、228、264) %。对

于沥青含量为 (5.1、5.6 和 6.1) % 的 SBS 改性混合物，与愈合循环前的混合物相比，愈合循环后的弹性模量分别增加 (12、7、0) %。对于沥青含量为 (4.8、5.3 和 5.8) % 的橡胶改性混合物，与愈合循环前的混合物相比，愈合循环后的弹性模量分别增加 (33、44、150) %。沥青含量对 SBS 混合物弹性模量的影响不显著，而对其他添加剂的影响则是可变的，如图 8 所示。

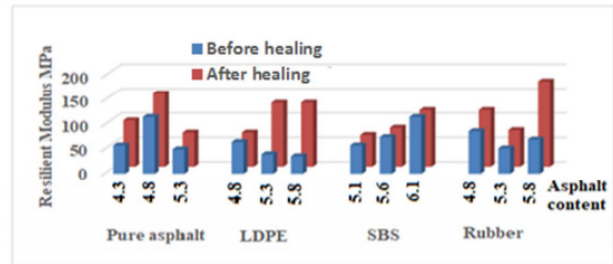


图 8. 裂纹愈合和聚合物添加剂对弹性模量的影响。

4. 结论

根据测试程序，可以得出以下结论。

(1) - 对于沥青含量为 (4.8、5.3 和 5.8) % 的 LDPE 改性沥青混合物，与对照混合物相比，愈合循环后弹性应变降低了 (6、69 和 72) %。对于沥青含量为 (5.1、5.6 和 6.1) % 的 SBS 改性沥青混合物，与对照混合物相比，在愈合循环后，弹性应变降低了 (11、7 和 0) %。对于沥青含量为 (4.8、5.3 和 5.8) % 的废轮胎橡胶改性沥青混合物，与对照混合物相比，在愈合循环后，弹性应变降低了 (25、30 和 60) %。

(2) - 与裂纹愈合循环后的对照混合物相比，愈合循环后纯沥青、SBS、橡胶和 LDPE 改性混合物在最佳沥青含量下的弹性模量分别增加 (29)、(7)、(44) 和 (228) %。

(3) - 从 SBS 改性沥青混合物的弹性微应变和模量角度来看，改性沥青混凝土对沥青含量的变化几乎不敏感，而 LDPE 改性沥青混合料的变化非常显著。

参考文献

- [1] S. I. Sarsam “Evaluation of changes in structural properties of Asphalt Concrete by the addition of scrap tire rubber”. Proceeding - 2ND Jordan Scientific conference of civil Engineering 16-17 November -Jordan. 1999.
- [2] S. I. Sarsam, and A. AL-Lamy “Fatigue Life Assessment of Modified Asphalt Concrete”, International Journal of Scientific Research in Knowledge, 3(2), pp. 030-041. 2015.
- [3] P. Pay “Effect of polymer modified bitumen on deformation characteristics of low-traffic asphalt pavements”. MSc. Thesis, Norwegian University of science and technology, NTNY, department of civil and environmental engineering, 2017.
- [4] Liu, Hanbing, et al. “Short-Term Aging Effect on

Properties of Sustainable Pavement Asphalts Modified by Waste Rubber and Diatomite” . Sustainability 9.6 pp.996. 2017.

[5] C. Rodrigues, and R. Hanumanthgaru, “ Polymer modified bitumen and other modified binders” . In R. N. Hunter, A. Self, & J. Read. The Shell Bitumen Handbook pp. 150– 76. London: ICE Publishing, 2015.

[6] B.O.Lerfald, and J. Aurstad, “Use of Polymer Modified Binders to develop more Lasting Pavements” . 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya: International Society for Asphalt Pavements (ISAP). 2011.

[7] A.V.Rudensky, “Road concrete pavement on modified bitumen” .Voronezh State University of Arch. And Civil Eng. Voronezh. pp.143. 2007.

[8] R. Hampl, O. Vacin, M. Jasso, J. Stastna, L. Zanzotto “Modelling of Tensile Creep and Recovery of Polymer Modified Asphalt Binders at Low Temperatures. Applied rheology, 25, pp.1–8. 2015.

[9] S. Sarsam and S.Al-Sadik “Contribution of Crumb Rubber in the Aging Process of Asphalt Concrete. International Journal of Scientific Research in Knowledge,

(IJSRK) 2(9), pp. 404–415. 2009.

[10] I. Kalgin, Yu, A. Strokin, and E. Tyukov, “Advanced technologies of road pavement construction and rehabilitation with application of modified bitumen. Voronezh regional publish house. pp. 224. 2014.

[11] American Society for Testing and Materials, “Annual Book of ASTM Standards, Road and Paving Materials; VehiclePavement System, Vol. 04.03. 2013.

[12] SCR.B. General Specification for Roads and Bridges, “Section R/9, Hot-Mix Asphalt Concrete Pavement” , Revised Edition. State Corporation of Roads and Bridges, Ministry of Housing and Construction, Republic of Iraq. 2003.

[13] S. Sarsam and S. Jasim “Assessing the properties of modified asphalt cement prepared under controlled heat and pressure” . Proceedings, Scientific conference of Ministry of construction, housing, municipality and public work, October 8–9, 2017, Baghdad.

[14] S. Sarsam, and H. Husain “Impact of Repeated Load on Crack Healing Cycles of Asphalt Concrete” . American Journal of Traffic and Transportation Engineering 1.3 pp. 26–33. 2016.