

文章编号:1672-9331(2021)04-0016-08

玄武岩—页岩混杂增强的沥青混合料 路用性能试验研究

张 辉¹, 潘友强¹, 张志祥¹, 钱 杰²

(1. 江苏中路工程技术研究院有限公司, 江苏 南京 211806; 2. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004)

摘 要: 为了研制一种轻质沥青混凝土, 采用轻质页岩与玄武岩的混杂碎石制备轻质高模量沥青混合料。通过 3 h 车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验, 研究了轻质页岩碎石对沥青混合料路用性能的影响规律, 并对 40% 轻集料体积替代率下混合料的动态模量和疲劳性能进行了试验研究。结果表明: 随着轻质页岩碎石掺入比例的提高, 轻质高模量沥青混合料的高温稳定性和水稳定性没有降低, 而低温弯曲性能随着轻集料掺量的增加先提高后降低; 当轻质页岩碎石的体积替代率为 20% 时, 沥青混合料的路用性能最佳。与常规高模量沥青混合料相比, 40% 轻集料体积替代率的沥青混合料在 15 °C, 10 Hz 条件下动态模量提高了 12.4%; 在 45 °C, 10 Hz 条件下动态模量和疲劳寿命分别提高了 38.1%, 14.2%。因此, 在沥青混合料中掺入体积占比为 40% 的页岩, 不仅可获得优良的路用性能, 节省优质的玄武岩资源, 而且有利于山林资源的保护, 促进道路行业“碳达峰、碳中和”目标的实现。

关键词: 轻质页岩; 高模量沥青混合料; 路用性能; 轻质铺装结构; 体积质量转换法

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Experimental study on pavement performance of basalt-shale hybrid reinforced asphalt mixture

ZHANG Hui¹, PAN You-qiang¹, ZHANG Zhi-xiang¹, QIAN Jie²

(1. Jiangsu Sinoroad Engineering Technology Research Institute, Nanjing 211806, China;

2. Jiangsu Traffic Engineering Bureau, Nanjing 210004, China)

Abstract: In order to develop the lightweight asphalt concrete, a light high-modulus asphalt mixture was prepared by using mixed macadam of light shale and basalt. By 3 h rutting test, low-temperature beam bending test, immersion Marshall and freeze-thaw splitting test, the influence law of light shale macadam on the pavement performance of asphalt mixture was studied. The dynamic modulus and fatigue property of the mixture with 40% volume substitution rate of light aggregate were experimentally studied. The results show that with the increase of the proportion of light shale macadam, the change of high temperature stability and water stability of light high-modulus asphalt mixture is not obvious, while the low temperature bending performance increases first and then decreases with the increase of light aggregate content; when the content of light shale macadam is 20%, the pavement

收稿日期: 2021-05-16

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20180113, BK20181112)

通讯作者: 张 辉(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事路面材料及其耐久性等方面的研究。E-mail: zh@sinoroad.com

performance of asphalt mixture is the best. The dynamic modulus of the asphalt mixture with 40% volume substitution rate of light aggregate increases by 12.4% under the condition of 15 °C, 10 Hz; the dynamic modulus and fatigue life increase by 38.1% and 14.2% under the condition of 45 °C, 10 Hz, respectively. Therefore, mixing 40% volume substitution rate of shale into the asphalt mixture not only can obtain excellent pavement performance, save high-quality basalt resources, but also is beneficial to protect mountain-forest resources, promote the aim of the road industry's "carbon peak, carbon neutralization" to realize.

Key words: lightweight shale; high-modulus asphalt mixture; pavement performance; lightweight pavement structure; volume-mass conversion method

目前,随着道路行业的不断发展,沥青混合料被大量使用,导致优质的玄武岩集料越来越稀有^[1-2]。此外,对于开启桥或受限于二期恒载,沥青混合料轻质化的需求也逐步被明确^[3-4]。轻集料是一种堆积密度小于 1 200 kg/m³ 的轻集料,分为天然轻集料和人造轻集料。人造轻集料在我国俗称陶粒,主要有页岩陶粒、粉煤灰陶粒和黏土陶粒等。其中,人造结构轻集料混凝土被广泛应用于建筑、桥梁等工程领域^[5]。美国在 20 世纪 50 年代采用高强轻集料修建了 800 多座桥梁;德国、荷兰早在 20 世纪 60 年代末就将轻集料混凝土应用于大跨径桥梁的建设中;挪威自 1987 年以来,已用密度为 1 940 kg/m³ 的 LC60 高强轻集料混凝土建造了 11 座桥梁^[6];日本在 20 世纪 60 年代研制出低吸水性、高强度、高性能的轻集料钢纤维增强混凝土,并用其新建和改建了 5 座新干线铁路桥梁。

近年来,高性能轻集料(800 级以上)技术的发展为轻集料沥青混凝土的广泛应用提供了新的动力^[7]。范倩等^[8]将高强页岩陶粒沥青混凝土与普通花岗岩石料沥青混凝土进行了对比研究,结果表明前者比后者的密度小 20% 左右,但路用性能无明显差异;用高强页岩陶粒沥青混凝土铺就的试验路段在使用 3 年后总体状况良好,无明显车辙,只有少量裂纹。张玉等^[9]研究了碎石型人造页岩轻集料配合比的设计方法、路用性能及微观机理,指出 900 级碎石型页岩陶粒是制备高强轻骨料混凝土的最优骨料。丁庆军等^[10]研发了一种轻集料钢筋聚合物水泥混凝土桥面的铺装材料,并将其应用在一些钢桥面的铺装工程中,对钢桥面板起到了加固补强的作用。

本研究采用页岩碎石替代部分玄武岩碎石,利用体积质量转换法对轻质沥青混合料进行配合比设计,制备了不同掺量的高强密水沥青混合料,并对其高温性能、低温性能、水稳定性、疲劳性能和动态模量等进行试验研究,分析了页岩掺量对沥青混合料性能的影响规律。研究成果可为大跨径、大柔度钢桥面、开启桥及二期恒载受限的桥梁等特殊应用场景提供更轻质且耐久的铺装材料,这在一定程度上节省了稀有的玄武岩碎石,避免了对玄武岩矿山的过度开采,保护了山林资源,促进了道路行业“碳达峰、碳中和”目标的实现。

1 材料及配合比设计

1.1 原材料

常规集料采用江苏茅迪公司生产的玄武岩;填料采用江苏高资产的石灰岩;轻集料选用湖北宝珠公司生产的 900 级碎石型高强页岩陶粒(图 1),粒径规格分别为 0~5, 5~20 mm,表观密度为 1.639 g/cm³,堆积密度为 0.890 g/cm³,吸水率为 3.8%,压碎值为 36.0%,针片状颗粒含量为 2.0%,沥青黏附性为 5 级。轻集料的技术要求见表 1。



(a) 5~20 mm

(b) 0~5 mm

图 1 碎石型高强页岩陶粒

Fig. 1 High-strength shale ceramsite of macadam type

表1 轻集料的技术要求

Table 1 Technical requirements for lightweight aggregate

项目	技术要求	试验方法
堆积密度/(kg·m ⁻³)	>800,且≤900	GBT17431.2
筒压强度/MPa	≥5.0	GBT17431.2
压碎值/%	≤36	T0316
吸水率/%	≤3.0	T0307
与沥青的黏附性等级	≥5	T0616

沥青采用高模量胶结料。参照法国高模量设计经验,通过在70#基质沥青中添加江苏路交科学技术有限公司生产的HM-1复合高模量改性剂制备高模量沥青胶结料。复合高模量改性剂是一种固体颗粒,除具有胶结、加筋及变形作用外,还能起到一定的温拌效果。复合高模量改性剂的掺量为沥青混合料质量的1.0%~1.2%,其技术要求见表2。

表2 复合高模量改性剂的技术要求

Table 2 Technical requirements for composite high-modular modifiers

项目	质量指标	试验方法
针入度(25℃,100g,5s)/(0.1mm)	≤5	GB/T 4509
软化点/℃	110~140	GB/T 4507
灰分/%	≤1.0	SH/T 0029
颗粒直径/mm	<2	—
熔滴点/℃	100~145	ASTM D3954

1.2 配合比设计

1.2.1 矿料级配设计

为保证混合料的密水效果(设计空隙率小于3%),一方面孔径为2.36mm及以上筛孔的通过率参考AC中值与上限部分;另一方面,提高油石比使混合料处于“富油”状态,提高孔径为0.075mm筛孔的通过率,并参照文献[11],得到轻质高强密水沥青混合料LHMAC-13的推荐级配范围,见表3。

表3 沥青混合料LHMAC-13的推荐级配范围

Table 3 Recommended gradation range of asphalt mixture LHMAC-13 %

级配类型	通过下列筛孔(方孔筛,mm)的质量百分率									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	—	68	50	—	—	—	—	10
级配下限	100	90	—	40	35	—	—	—	—	6

通过级配调试,以小于空隙率3%为目标,最终确定了不同轻集料体积替代率下混合料的级配曲线,如图2所示。

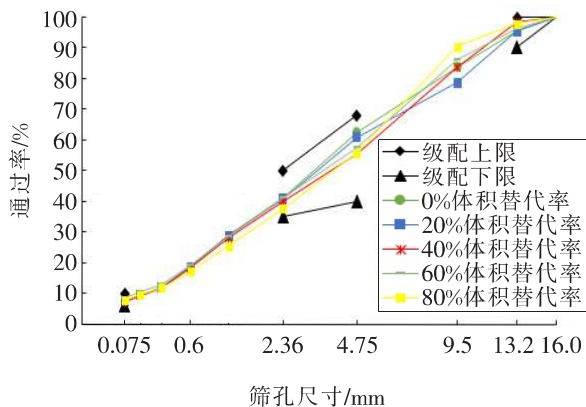


图2 不同轻集料体积替代率下混合料的级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of mixtures with different volume substitute rates of light aggregate

陶粒的密度只有普通集料密度的50%左右。因此,与普通集料相比,陶粒在混合料中占据了更大的空间,细集料占据的空间则相对变小。这样混合料的矿料间隙率将增大,需要更多的沥青来填充矿料间隙,从而油石比增大,最终导致沥青用量增加,成本提高。为解决这一问题,本研究采用体积质量转换法,将级配设计结果作为各种矿料的体积配合比^[12-13],然后按下式进行换算:

$$P_{m,i} = \frac{P_{v,i} \times \gamma_i}{\sum_{i=1}^n P_{v,i} \times \gamma_i} \quad (1)$$

式中: $P_{m,i}$ 为某种矿料成分的质量配合比,%; $P_{v,i}$ 为某种矿料成分的体积配合比,%; γ_i 为某种矿料成分的毛体积相对密度。

不同轻集料体积替代率下混合料中各矿料的质量占比见表4。

表 4 不同轻集料体积替代率下混合料中各矿料的质量占比

Table 4 Mass proportion of each mineral in the mixture with different volume substitution rates of lightweight aggregate

体积替代率	各矿料质量占比						
	玄武岩	玄武岩	轻集料	玄武岩	轻集料	石灰岩	矿粉
	10~15 mm	5~10 mm	5~15 mm	3~5 mm	0~3 mm	0~3 mm	
0	22.0	20	0	20.0	0	35.0	3.0
20	25.7	0	11.6	23.2	0	36.2	3.3
40	8.0	0	26.5	13.2	0	48.5	3.8
60	10.3	0	29.3	0	17.1	39.2	4.1
80	0	0	41.4	0	29.0	25.0	4.6

1.2.2 最佳油石比的确定

为确定轻质高强密水沥青混合料的最佳油石比,在不同油石比条件下(5.0%,5.5%,6.0%,6.5%,7.0%)对其进行马歇尔稳定度试验。根据混合料高模量、低空隙率的性能特点,以马歇尔稳定度最大值对应的油石比为最佳油石比,得到不同轻质页岩碎石体积替代率下混合料的马歇尔稳定度,如图 3 所示。不同轻集料体积替代率下混合料的体积指标检测结果见表 5。

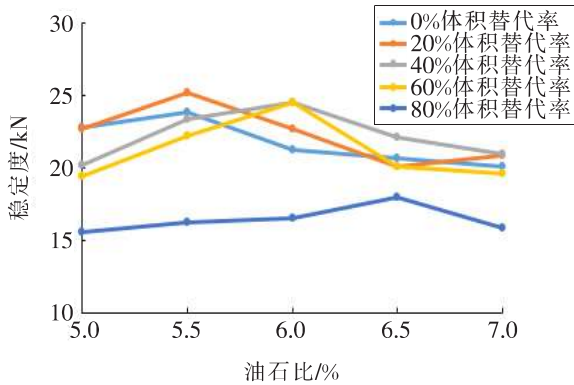


图 3 不同轻集料体积替代率下混合料的马歇尔稳定度

Fig. 3 Marshall stability of mixture with different volume substitute rates of light aggregate

表 5 不同轻集料体积替代率下混合料体积指标检测结果

Table 5 Test results of mixture volume indexes with different volume substitute rates of light aggregate

体积替代率/%	最佳油石比/%	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	理论最大密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%
0	5.2	2.586	2.615	1.1
20	5.5	2.388	2.420	1.3
40	5.8	2.175	2.195	0.9
60	6.2	2.023	2.030	0.3
80	6.7	1.786	1.187	1.7

分析表 5 可知:与轻集料体积替代率 0%,20%,40%,60%,80%相对应的最佳油石比分别为 5.2%,5.5%,5.8%,6.2%,6.7%。轻集料的体积替代率每增加 20%,最佳油石比大约增加 0.3%~0.5%。

2 结果分析

2.1 对高温稳定性的影响

采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中的沥青混合料车辙试验对轻质高强密水沥青混合料的高温稳定性进行研究,试验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出:不同轻集料体积替代率下混合料的动稳定度均超过 8 000 次/mm,随着轻集料的增加,沥青混合料的动稳定度没有明显的变化趋势,说明轻集料掺量的变化对混合料的高温性能没有明显影响。

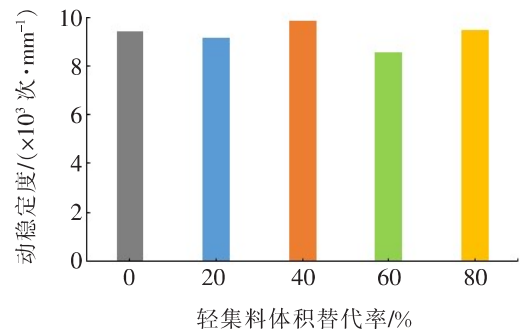


图 4 不同轻集料体积替代率下混合料的动稳定度

Fig. 4 Dynamic stability of mixture with different volume substitute rates of light aggregate

为评估轻质高强密水沥青混合料的长期高温性能,本研究进一步针对 40%轻集料体积替代率

下的高强密水混合料进行了 60 °C 条件下 3 h 的车辙试验,并与不掺轻集料的常规高强密水混合料进行对比,试验结果如图 5 所示。分析图 5 可知:与常规高强密水混合料相比,40%轻集料体积替代率下的高强密水混合料的 3 h 动稳定度更高,车辙变形更小。究其原因主要有两方面:一是页岩陶粒外表粗糙和不规则的纹理增大了集料间的接触界面和表面摩擦系数^[14],进而增大了混合料颗粒之间的相对移动阻滞力,提高了沥青陶粒混凝土的抗剪强度及耐磨性能;二是页岩陶粒内部多孔,与沥青胶结料的黏附性较好,通过对沥青产生吸附降低混合料中自由沥青的含量,减少荷载作用下颗粒的滑动移位,提高混合料的抗变形能力。

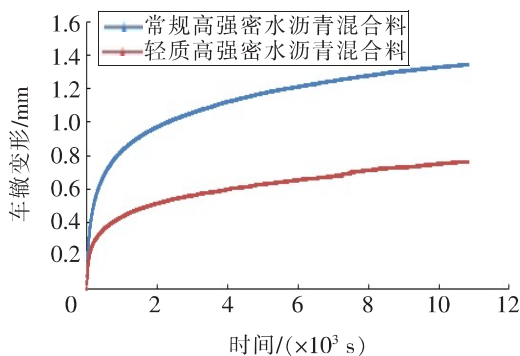


图 5 3 h 车辙变形试验

Fig. 5 3 h rutting deformation test

2.2 对水稳定性的影响

采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验对轻质高强密水沥青混合料的抗水损害性能进行研究。浸水马歇尔试验中试件的击实次数为正反各 75 次,冻融劈裂试验中试件的击实次数为正反各 50 次。

浸水马歇尔试验结果如图 6 所示。从图 6 可以看出:不同轻集料体积替代率下混合料的残留稳定度均在 90% 以上,水稳定性优良。说明轻集料的掺量对沥青混合料的浸水残留稳定度影响不大,这主要是因为级配设计为密级配,且油石比较高,空隙率不超过 3%,水分无法渗入混合料内部。

不同体积替代率下轻质高强密水沥青混合料的条件和非条件冻融劈裂强度和冻融劈裂强度比如图 7 所示。从图 7(a)可以看出:轻集料掺量的变化对混合料冻融劈裂强度的影响不大。在施加

荷载的过程中,页岩陶粒易被压碎,混合料中遂出现薄弱点;随着页岩陶粒掺量的增加,混合料中薄弱点的数量也随之增多,混合料的劈裂强度有所降低。随着轻集料掺量的增加,混合料的油石比也在逐步提高。沥青用量的增加对混合料冻融劈裂强度有改善作用,可以有效降低页岩碎石对混合料冻融劈裂强度的不利影响。从图 7(b)可以看出:不同体积替代率下轻质高强密水沥青混合料的冻融劈裂强度比均在 80% 以上,且其随轻集料掺量的增加所呈现出来的变化规律并不明显,与未加轻集料的常规密水混合料的冻融劈裂强度比相差不大。

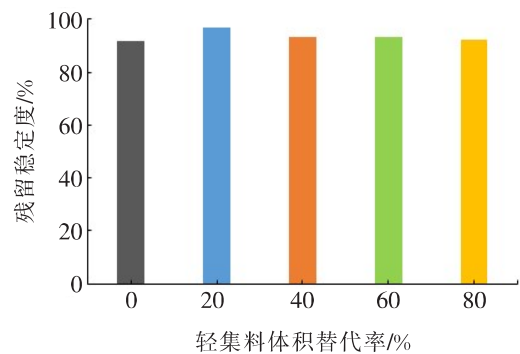
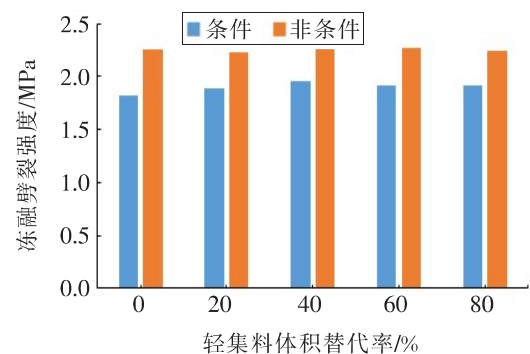
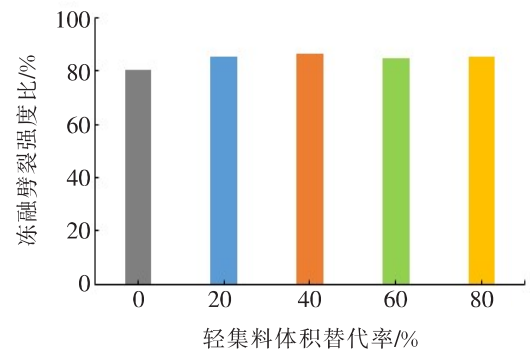


图 6 浸水马歇尔试验结果

Fig. 6 Results of immersion Marshall test



(a) 条件和非条件冻融劈裂强度



(b) 冻融劈裂强度比

图 7 冻融劈裂试验结果

Fig. 7 Results of freeze-thaw splitting test

2.3 对低温抗裂性的影响

采用 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温小梁弯曲试验对轻质高强密水沥青混合料的低温抗裂性能进行研究,试验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出:当轻集料的体积替代率为 20% 时,混合料的极限弯拉应变提高了 15.44%。但随着轻集料体积替代率的进一步增加,混合料的极限弯拉应变开始降低,轻集料的体积替代率每增加 20%,混合料的极限弯拉应变约降低 10%。

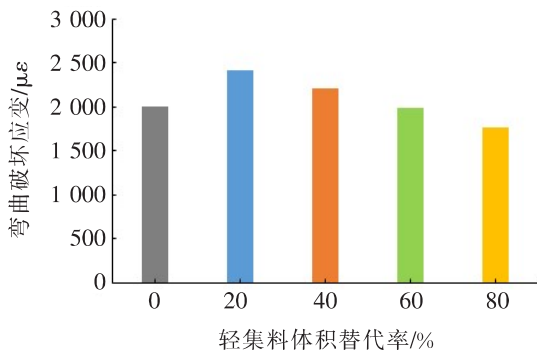


图 8 低温小梁弯曲试验结果

Fig. 8 Results of low-temperature beam bending test

随着轻集料掺量的进一步提高,直至超过非轻集料的掺量后,小梁试件发生脆断,且断面多出现在轻集料内部,此时弯曲应变降低。根据低温弯曲试验的结果,为保证轻质高强密水沥青混合料的极限弯拉应变满足技术规范的要求,即要大于或等于 $1\ 800\ \mu\epsilon$ ^[11],因此建议轻集料的体积替代率不超过 40%。

2.4 对疲劳性能的影响

采用四点弯曲疲劳试验对常规高强密水沥青混合料与轻质高强密水沥青混合料(轻质页岩的体积替代率为 40%)的疲劳性能进行研究,加载应变为 $400\ \mu\epsilon$,试验温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验结果见表 6。

表 6 疲劳性能检测结果

Table 6 Test results of fatigue performance

混合料类型	平均疲劳寿命/次	初始劲度模量/MPa	滞后角/ $(^{\circ})$	累积耗散能/MPa
常规高强密水沥青混合料	68 700	13 772	9.44	5.77
轻质高强密水沥青混合料	78 480	14 596	11.62	7.53

从表 6 可以看出:轻质高强密水沥青混合料的初始劲度模量为 $14\ 596\ \text{MPa}$,与常规高强密水沥青混合料相比,提高了 6.0%;疲劳次数为 78 480 次,提高了 14.2%。由于轻质高强密水沥青混合料的沥青含量较高,在疲劳试验过程中表现出了较好的黏韧性,因而滞后角较大。滞后角越大,迟滞回线所包围的面积也就越大,累积的塑性应变耗散能也就越多,因此轻质高强密水沥青混合料的累积耗散能比常规密水混合料的增大了 30.5%。由于骨料界面处气孔的存在会造成局部结构疏松,因而界面区是沥青混凝土结构中的薄弱环节。此外,界面区还是沥青混凝土结构中最容易被侵蚀的部位。界面区域的薄弱连接,使混凝土的耐久性有所降低。轻质陶粒呈中性,略偏酸性,表面多孔,吸油率较高,因而在沥青与页岩陶粒之间产生了很好的界面黏结作用,大大改善了界面结构和沥青混凝土的整体性,因此轻质高强密水沥青混合料的耐久性要优于常规高强密水沥青混合料。

2.5 对动态模量的影响

文献[11]提出了在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\ \text{Hz}$ 的条件下高模量沥青混合料的复数剪切模量要大于 $14\ 000\ \text{MPa}$ 的指标要求。本研究采用动态模量试验方法^[15]评价了轻质页岩体积替代率为 40%的轻质高强密水沥青混合料在 9 种频率(范围为 $0.1\sim 25.0\ \text{Hz}$)下的动态模量,并考虑了 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 常温与 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温两个温度条件。根据 SPT 动态模量试验,得到应力幅值、应变幅值以及相位角,然后利用下式计算得到试件的动态模量:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin\varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (2)$$

式中: $|E^*|$ 为动态模量,MPa; σ_0 为应力幅值,kPa; ϵ_0 为应变幅值; φ 为相位角。

动态模量的试验结果如图 9 所示。从图 9 可以看出:随着加载频率的增大,轻质高强密水沥青混合料的动态模量呈上升趋势。与常规高强密水沥青混合料相比,在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\ \text{Hz}$ 的条件下,轻质高强密水沥青混合料的动态模量达到了 $16\ 482\ \text{MPa}$,提高了 12.4%;在 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\ \text{Hz}$ 条件下动态模量为 $3\ 152\ \text{MPa}$,提高了 38.1%。说明在同等条件下,轻质高强密水沥青混合料的动态模量要高于常规高强密水沥青混合料,这主要是因为轻质页岩碎石高模量混合料的油石比更高,胶结效果更明显,因而动态模量也更大。

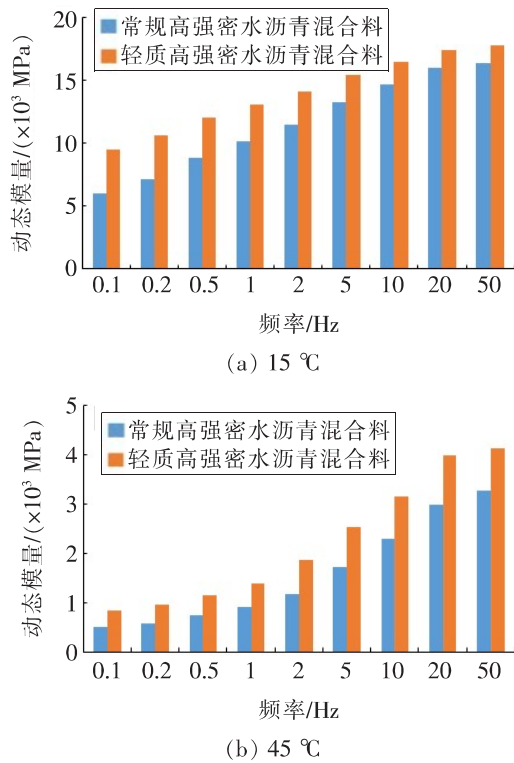


图9 不同温度下动态模量试验结果

Fig. 9 Test results of dynamic modulus at different temperatures

3 结论

研究了用轻质页岩碎石部分替代玄武岩碎石后沥青混合料性能的变化规律,并研发了一种轻质高强密水沥青混合料。主要结论如下:

1) 随着轻集料掺量的增加,混合料的最佳油石比也会相应增加,轻集料的体积替代率每增加20%,最佳油石比大约增加0.3%~0.5%。

2) 与常规高强密水沥青混合料相比,加入轻集料对沥青混合料的强度、变形能力、水稳定性、高温稳定性的影响不明显。在不同轻集料体积替代率下,沥青混合料的动稳定度均超过了8000次/mm,3h车辙变形则比常规高强密水沥青混合料的小;轻集料掺量变化对混合料的水稳定性影响不大,不同轻集料体积替代率下沥青混合料的残留稳定度与冻融劈裂强度比分别超过了90%和80%,说明轻质高强密水沥青混合料的水稳定性比较优良。

3) 随着轻集料掺量的增加,轻质高强密水沥青混合料的低温性能先有所提升,但当轻集料掺量的占比超过非轻集料后,沥青混合料的低温弯

曲应变开始降低,因此建议轻集料的体积替代率不超过40%。

4) 与常规高强密水沥青混合料相比,当轻集料的体积替代率为40%时,沥青混合料的疲劳寿命为78480次,提高了14.2%;在15 °C,10 Hz的条件下,其动态模量为16482 MPa,提高了12.4%;在45 °C,10 Hz的条件下,其动态模量为3152 MPa,提高了38.1%。

〔参考文献〕

- [1] 于华洋,马涛,王大为,等. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报,2020,33(10):1-66.
YU Hua-yang, MA Tao, WANG Da-wei, et al. Review on China's pavement engineering research · 2020[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020,33(10):1-66.
- [2] 李超,陈宗武,谢君,等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. 材料导报,2017,31(3):86-95,122.
LI Chao, CHEN Zong-wu, XIE Jun, et al. A technology and applicational review on steel and slag asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2017, 31(3): 86-95, 122.
- [3] 陆婷. 浅析国内轻质沥青混合料研究现状[J]. 城市道桥与防洪,2017(7):48-49.
LU Ting. Analysis on the present situation of lightweight asphalt mixture in China[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(7):48-49.
- [4] 刘栋,李立寒,杨昆. 生活垃圾焚烧炉渣沥青混合料的耐久性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016(1):100-106.
LIU Dong, LI Li-han, YANG Kun. Durability of asphalt mixture containing municipal solid waste incineration bottom ash aggregate[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016(1):100-106.
- [5] 甘立,吴瑞卿,甘伟,等. 人造轻集料混凝土配合比设计探讨[J]. 广东建材,2021,37(1):5-7.
GAN Li, WU Rui-qin, GAN Wei, et al. Design of concrete mix ratio of artificial lightweight aggregate [J]. Guangdong Building Materials, 2021, 37(1): 5-7.
- [6] 张礼华. 基于界面优化的铬铁冶金渣轻集料制备及混凝土性能研究[D]. 南京:东南大学,2018.
ZHANG Li-hua. Preparation of lightweight aggregate use by ferrochrome slag based on the interfacial zone optimization and the performance of concrete

- [D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 1-9.
- [7] 王朝辉,刘鲁清,韩晓霞,等. 路用多孔页岩陶粒表面修饰优化[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 196-206.
WANG Chao-hui, LIU Lu-qing, HAN Xiao-xia, et al. Optimization of surface modification of porous expanded shale [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 196-206.
- [8] 范倩,解晓光. 破碎型页岩陶粒沥青混合料最佳掺量及路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(4): 718-721, 727.
FAN Qian, XIE Xiao-guang. Study on the optimum content and road performance of crushed shale ceramsite asphalt mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(4): 718-721, 727.
- [9] 张玉,刘伯权,吴涛,等. 高强页岩轻骨料混凝土配合比与微观结构研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(2): 225-232.
ZHANG Yu, LIU Bo-quan, WU Tao, et al. Mechanical properties and microstructure of high-strength lightweight aggregate concrete with shale ceramsite [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2018, 50(2): 225-232.
- [10] 丁庆军,黄修林,马平,等. 高强次轻混凝土的设计及其在钢桥面铺装中的应用[J]. 施工技术, 2007, 36(12): 64-66.
DING Qing-jun, HUANG Xiu-lin, MA Ping, et al. Design of high strength semi-lightweight concrete and application in steel bridge deck pavement [J]. Construction Technology, 2007, 36(12): 64-66.
- [11] DELORME J L, CHANTAL D, WENDLING L, et al. *LPC bituminous mixtures design guide* [S]. Paris: The RST Working Group, 2010.
- [12] 陈安京. 温拌高模量沥青混合料性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 33-39.
CHEN An-jing. Experimental research on the performance of warm mix high-modulus asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 33-39.
- [13] 李淋玉. 桥面铺装用轻型环氧沥青混凝土开发与试验研究[J]. 公路工程, 2016, 41(5): 36-39.
LI Lin-yu. Bridge deck pavement with lightweight development and experimental study on the epoxy asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2016, 41(5): 36-39.
- [14] 高二利. 500~700密度等级渣土陶粒的研制及其性能[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 25-31.
GAO Er-li. The fabrication and the performance of 500~700 density grade muck ceramsite [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 25-31.
- [15] 蔡湘运. 30# 沥青 AC-20 混合料动态模量及主曲线试验研究[J]. 公路与汽运, 2019(5): 59-61, 151.
CAI Xiang-yun. Experimental study on dynamic modulus and principal curve of 30# asphalt AC-20 mixture [J]. Highways & Automotive Application, 2019(5): 59-61, 151.