

沥青混合料动态模量梯形梁与 SPT 试验比较研究

黄优¹, 刘朝晖¹, 王旭东², 李盛³

- (1. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙, 410114;
2. 交通运输部 公路科学研究院, 北京, 100088;
3. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙, 410114)

摘要: 选用 70 号基质沥青和 SBS 改性沥青 2 种沥青材料、4.75 mm 筛孔通过率分别为 35%和 55%的 2 种级配组合成 4 种沥青混合料, 分别进行梯形梁和简单性能试验机(SPT)动态模量试验研究。基于时温等效原理, 用非线性最小二乘法绘制参考温度为 20 °C 的动态模量和相位角主曲线。研究结果表明: 梯形梁和 SPT 试验得到的动态模量与相位角的主曲线变化趋势一致, 但有明显区别; 梯形梁试验的主曲线频域更窄, 动态模量更小, 相位角更大, 且所得动态模量和相位角对频率(温度)的变化更敏感; 频率(温度)也会对 2 种试验方法下动态模量和相位角的差异程度产生影响; SBS 改性剂可以改善沥青混合料的动态力学性能及其路用性能; 使用回归方程对 2 种试验方法行的动态模量进行转换拟合的相关性良好; 加载模式对动态模量的影响显著, 应当根据路面结构层的受力状况选择合适的动态模量试验方法。

关键词: 道路工程; 动态模量; 梯形梁试验; 简单性能试验机(SPT)

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)11-3092-08

Comparison of HMA dynamic modulus between trapezoid beam test and SPT

HUANG You¹, LIU Zhaohui¹, WANG Xudong², LI Sheng³

- (1. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
3. State Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: No.70 matrix asphalt (asphalt with penetration 70) and SBS modified asphalt of two gradations with 4.75 mm sieve passing percent being 35% and 55% were used to make four asphalt mixes to conduct dynamic modulus tests using trapezoid beam test and simple performance tester (SPT). Master curves of dynamic modulus and phase angle at reference temperature 20 °C were plotted based on temperature-time transition principle using non-linear least square method. The results show that trends of the master curves of trapezoid beam test and SPT are the same. Compared with

收稿日期: 2016-11-27; 修回日期: 2017-01-28

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51678078); 长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金资助项目(kfj150304); 长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金资助项目(kfj150102) (Project(51678078) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(kfj150304) supported by Open Found of Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport, Changsha University of Science & Technology; Project(kfj150102) supported by Open Fund of State Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology)

通信作者: 刘朝晖, 教授, 博士生导师, 从事路面结构与材料研究; E-mail: u_hwung@163.com

SPT, the master curve scope of trapezoid beam test is smaller, and the dynamic moduli is smaller, while the phase angle is larger; dynamic modulus and phase angle of trapezoid beam test are more sensitive to frequency (temperature) changes. The differences of dynamic modulus and phase angle between the two methods are influenced by frequency (temperature). SBS modifier can improve dynamic mechanical property and pavement performance of asphalt mixes. Regression equation for the dynamic moduli transformation of the two methods indicates that good correlation between the dynamic modulus of the two methods can be obtained. Load modes affect dynamic modulus, and appropriate test method should be selected according to the stress state of pavement.

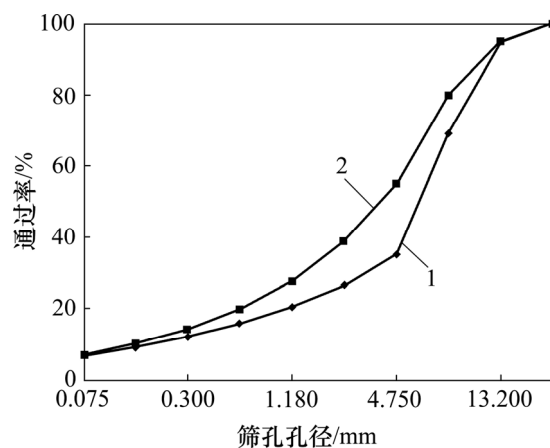
Key words: road engineering; dynamic modulus; trapezoid beam test; simple performance tester (SPT)

沥青混合料作为高等级路面的主要材料具有典型的黏弹性, 其力学性能受温度、荷载频率、应力(应变)水平等因素的影响^[1-2]。沥青混合料在道路服役过程中受到来自车辆荷载和外界环境的交替作用, 常规的静态模量已不足以描述其力学行为。目前, 国内的许多道路即使按照现有的设计规范和要求进行设计施工, 仍然出现了早期损坏, 难以实现长寿命路面的目标。而动态模量能够较好地描述沥青混合料的动力学性能和黏弹特性, 更加符合路面实际受力状况^[3-4]。美国 MEPDG 力学经验法等沥青路面设计方法明确将动态模量作为沥青路面设计的重要输入参数^[5]。动态模量的试验方法有多种, 国内外的研究主要集中在单轴压缩、间接拉伸、四点弯曲和半圆弯曲等方法上^[6-9]。王旭东等^[10-13]在对沥青混合料的动态力学研究中发现不同的试验方法对动态模量的影响很大。梯形梁试验方法作为两点弯曲(two-point bending)模式的典型代表, 是沥青混合料动态模量的基本试验方法之一, 在欧洲得到了广泛应用, 但是国内的相关研究很少。该方法采用梯形试件进行动态模量试验: 试件底部固定, 顶部受到水平连续正弦荷载作用, 采用应力控制或者应变控制模式, 不仅可以考察温度和频率, 还能够考察荷载水平对动态模量的影响。试验中, 试件受到弯-剪综合作用, 内部应力状态比较符合路面结构的实际受力状况。此外, 从 1995 年开始, 美国 SHRP 计划就对动态模量试验方法进行了研究; 随后开展了简单性能试验机(simple performance tester, SPT)的研发。SPT 采用单轴压缩模式, 一般选用旋转压实仪对试件成型, 试件的径高比为 1.0:1.5 或者 1.0:2.0。施加偏正弦波或半正弦波的轴向压应力, 可以在不同温度和频率下进行动态模量试验。SPT 试验方法简单、有效、稳定, 是目前研究沥青混合料动态模量应用最为广泛的仪器之一^[14]。本文作者使用梯形梁和 SPT 这 2 种设备分别对 4 种沥青混合料进行动态模量试验, 根据时温等效原理绘制各自的动态模量及相位角主曲线对沥青混合料的动力学特性进行分析, 并对 2 种试验方法进行比较和评价。

1 动态模量试验方案

1.1 沥青混合料设计及试件制作

SAC-16 型沥青混合料是沙庆林^[15]提出的多碎石沥青混凝土, 结合了 AC-16I 型混合料密实透水性小和 AC-16II 型混合料抗滑性能好的优点。SAC-16 混合料的关键筛孔 4.75 mm 通过率为 35%~47%。在实际工程应用中, 适当提高细集料比例, 可以进一步提高面层的密实性。为此, 选用 4.75 mm 筛孔通过率分别为 35%和 55%这 2 个级配, 70 号基质沥青和 SBS 改性沥青这 2 种沥青材料, 组合成 4 种沥青混合料, 分别记为 70#SAC16-35, 70#SAC16-55, SBS-SAC16-35 和 SBS-SAC16-55。沥青混合料级配见图 1。



1—AC16-35; 2—SAC16-55。

图 1 沥青混合料级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of HMA

按照试验规程和使用说明, 将所选材料成型、切割、打磨得到标准尺寸试件^[16-17]。梯形梁试件上底长为 25 mm, 下底长为 56 mm, 高为 250 mm, 厚为 25 mm。对梯形梁试件的尺寸、质量和表观密度等进行测量和记录。每试件的表观密度与同批次所有试件

的平均密度的偏差不得超过 1%，否则该试件作废。试件储存时水平放置，气温不超过 30 °C^[17]。SPT 试件为直径×高度 100 mm×150 mm 的圆柱体，对试件的尺寸、质量和表观密度进行测量和记录，储存温度为 5~15 °C。

1.2 试验方案

梯形梁试验采用 0~45 °C 共 9 种温度，在每种温度试验开始前进行 4 h 预热养生。梯形梁设备通过调整加载轮的偏心度可以直接控制应变水平，选定应变水平为 100 $\mu\epsilon$ ；加载频率取 10~40 Hz。SPT 试验采用 5~50 °C 共 8 种温度，每种温度试验开始前进行 6 h 预热养生。SPT 无法直接精确控制应变水平，NCHRP 9-29 项目推荐的试验范围为(70~125) $\mu\epsilon$ ，试验者根据选择合适的范围。为了方便与梯形梁试验结果进行比较，本试验方案采用(90~110) $\mu\epsilon$ ；加载频率为 0.01~25.00 Hz。当频率较高或温度较低时，沥青混合料材料的模量较大，且表现出更多的弹性，累计变形较小。试验时，岩浆岩从低温变化到高温，每个温度从高频变化到低频。试样成型示意图见图 2，具体试验方案见表 1。

2 试验结果与分析

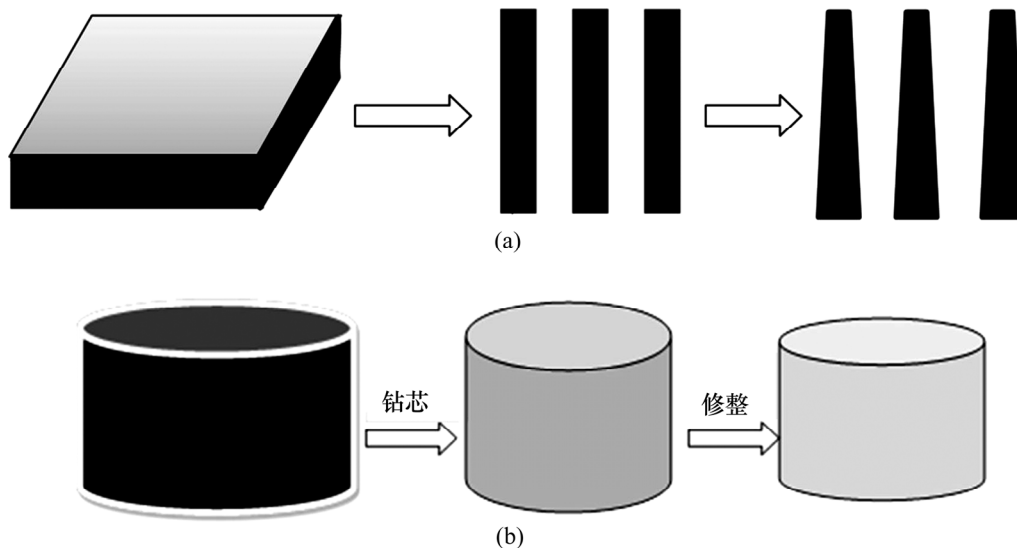
对于黏弹性材料，同样的力学性质可以在高温—高频率或在低温—低频率下得到，这就是时温等效原理^[1]。根据时温等效原理对各试验温度下的曲线进行平移得到主曲线。主曲线是 1 条通过数据中央并满足自相合的光滑曲线，从而真实地反映数据形态。主曲线将一定时间、温度范围内的试验结果拓展到更广泛的时温空间，从而比较完整地反映出沥青混合料的动力学特性和黏弹性能^[18-19]。

2.1 主曲线比较分析

根据沥青混合料的时温等效原理，采用 Boltzmann 函数进行最小二乘法数值拟合，得到 20 °C 为基准温度的动态模量主曲线：

$$\lg y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\lg(f - x_0)/dx}} \quad (3)$$

式中： y 为动态模量常用对数值； f 为频率常用对数值； A_1 和 A_2 为主曲线的上、下渐近线； x_0 和 dx 为描述曲



(a) 梯形梁成型过程；(b) SPT 试件成型

图 2 试件成型示意图

Fig. 2 Sketchs of specimen preparation

表 1 动态模量试验方案

Table 1 Scheme of dynamic modulus test

试验方法	温度/°C	应变水平/($\mu\epsilon$)	频率/Hz
梯形梁	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	100	40, 35, 30, 25, 20, 15, 10
SPT	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	90~110	25, 20, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.01

线形状的参数。

动态模量的主曲线确定了唯一的水平移位因子 $lg(\alpha_T)$, 通过该移位因子对相位角曲线进行平移, 继而得到相位角的主曲线^[18]。

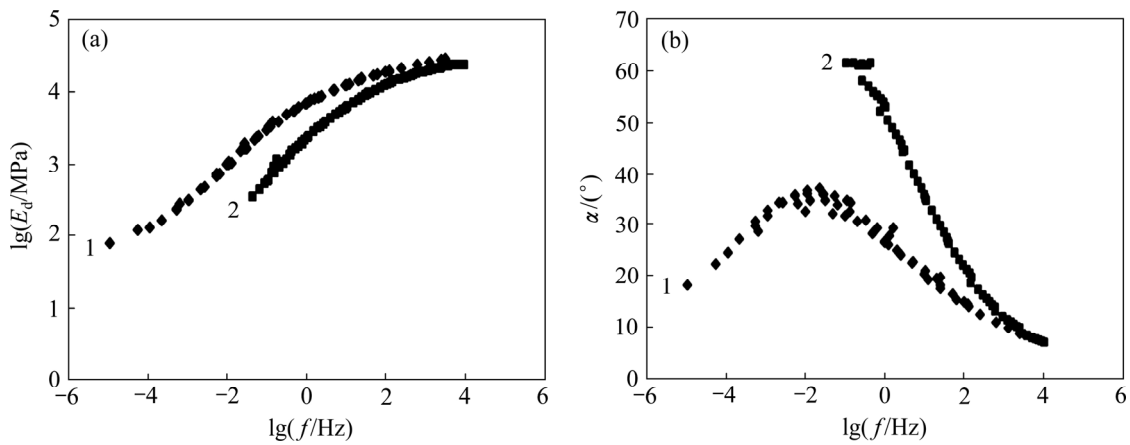
70#SAC16-35, 70#SAC16-55, SBS-SAC16-35 和 SBS-SAC16-55 的动态模量及相位角主曲线分别见图 3~6。

从图 3~6 可以看出: 梯形梁与 SPT 试验的动态模量有明显区别, 但变化趋势一致, 即动态模量随着频率降低(温度上升)而降低, 呈典型的 S 型; 相位角随着频率降低(温度上升)有一个先增大后减小过程。这是因为相位角表征的是材料的黏弹性能, 相位角越大, 表明材料更多地呈现出黏性性能。当温度在一定范围

内时, 沥青混合料的黏弹性能主要受沥青材料的影响, 即沥青混合料的黏性随着温度上升(频率降低)而增大。当温度超过一定范围时, 沥青材料已经变软, 逐渐失去黏结作用, 此时, 沥青混合料主要依靠骨架结构, 因此, 黏性随着温度上升反而减小。在 2 种试验方式中, 级配对动态模量的影响很小。对于同一种级配, 采用 SBS 改性沥青的混合料与采用基质沥青的混合料相比动态模量更大, 相位角更小, 说明 SBS 改性剂改善了沥青材料的高、低温性能, 从而提高了沥青混合料的路用性能^[20]。

对比梯形梁与 SPT 试验所得的动态模量与相位角主曲线发现:

- 1) SPT 的动态模量和相位角主曲线的频域更广,

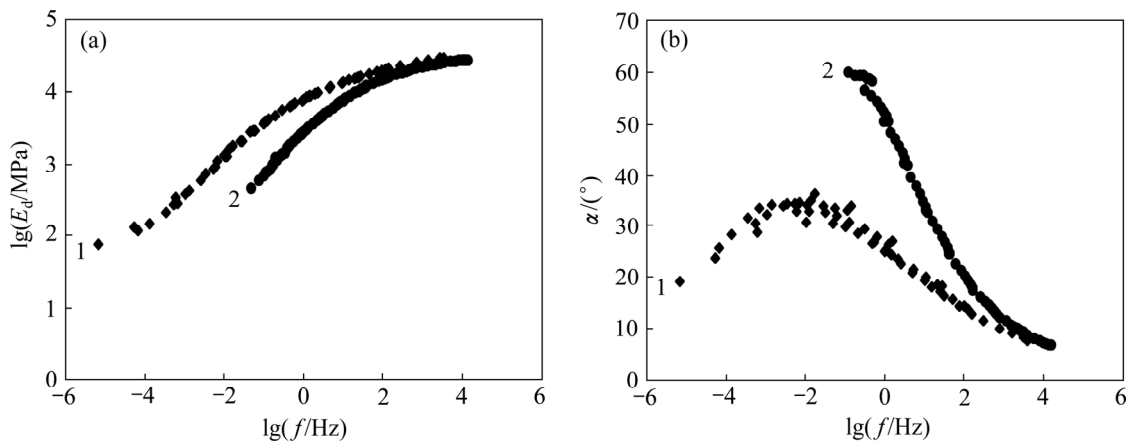


(a) 动态模量主曲线; (b) 相位角主曲线

试验方法: 1—SPT; 2—梯形梁。

图 3 70#SAC16-35 动态模量及相位角主曲线

Fig. 3 Master curves of dynamic modulus and phase angle of 70#SAC16-35

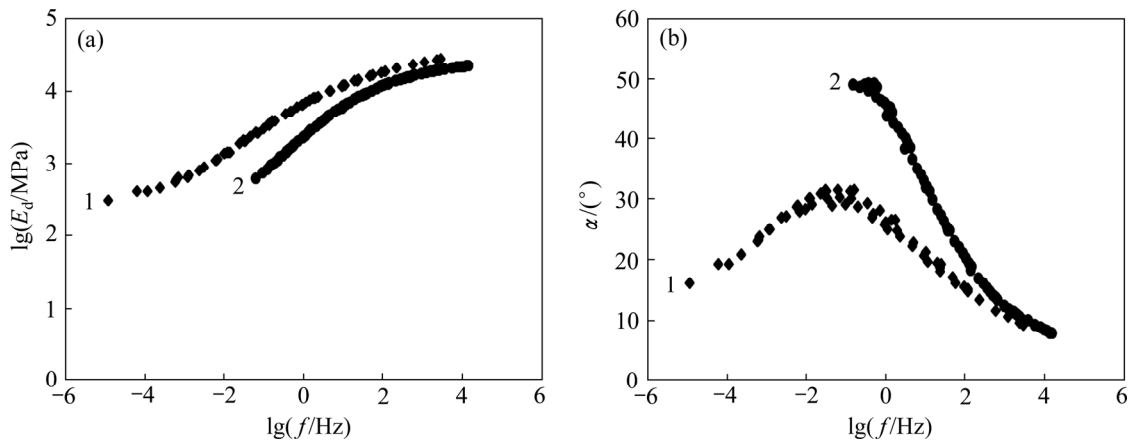


(a) 动态模量主曲线; (b) 相位角主曲线

试验方法: 1—SPT; 2—梯形梁。

图 4 70#SAC16-55 动态模量及相位角主曲线

Fig. 4 Master curves of dynamic modulus and phase angle of 70#SAC16-55

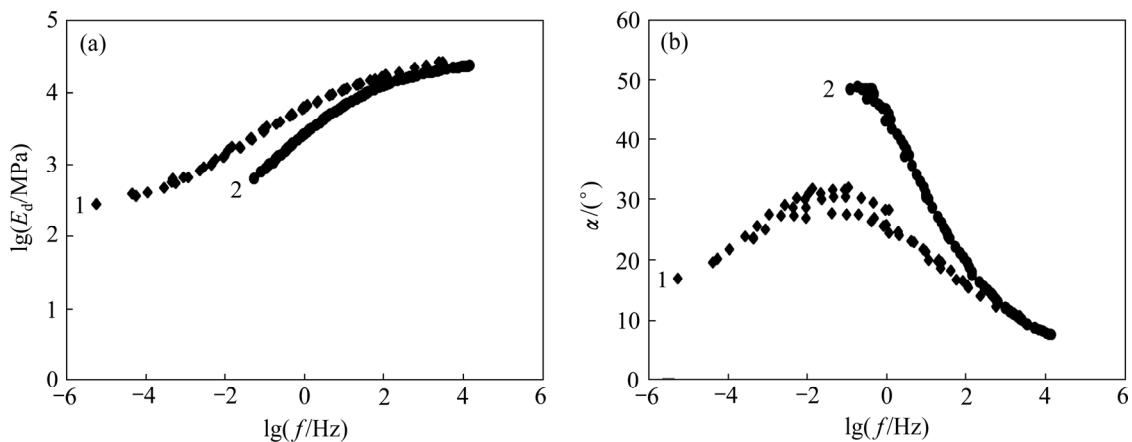


(a) 动态模量主曲线; (b) 相位角主曲线

试验方法: 1—SPT; 2—梯形梁。

图 5 SBS-SAC16-35 动态模量及相位角主曲线

Fig. 5 Master curves of dynamic modulus and phase angle of SBS-SAC16-35



(a) 动态模量主曲线; (b) 相位角主曲线

试验方法: 1—SPT; 2—梯形梁。

图 6 SBS-SAC16-55 动态模量及相位角主曲线

Fig. 6 Master curves of dynamic modulus and phase angle of SBS-SAC16-55

而梯形梁试验的主曲线不能延伸到低频区域, 这主要是因为 SPT 的最低频率(0.01 Hz)低于梯形梁的最低频率(10 Hz)。

2) SPT 试验得到的动态模量比梯形梁试验得到的略大, 在高频(低温)时, 两者动态模量较接近; 随着频率降低(温度上升), 动态模量曲线逐渐发散, 差别不断增大。相位角有着类似的变化关系, 无论是动态模量还是相位角, 梯形梁的斜率都更大, 说明其动态模量和相位角对频率(温度)更加敏感。这些差异主要是因为不同加载模式在试件内部产生不同应力状态, 而混合料本身具有非均质性和各向异性: SPT 试验采用的是单轴压缩模式, 试件在压力反复作用下不断压实; 荷载对试件有利, 胶结料的黏结作用和骨料间的

嵌挤作用均加强, 集料与集料之间的法向正应力和切向摩擦力都增大, 传力路径明确, 因此, 抵抗变形的能力更强, 测得的动态模量更大且更稳定; 同时, 由于骨架结构对荷载的有效传递和分散, 胶浆对整个混合料的动力学性能影响变弱, 沥青混合料的黏弹性能受沥青材料黏弹性能的影响较小, 因此, 得到的相位角更小且受频率(温度)的影响更小。相反, 在梯形梁试验中, 试件主要承受弯曲作用, 在试件的受拉侧, 骨料在拉力作用下趋于分离, 骨料嵌挤作用削弱, 混合料主要依赖沥青胶浆的黏结力来传递和分散荷载, 其力学性能更多地依赖于沥青材料。而沥青胶浆抵抗变形的能力较弱, 并且黏弹性能容易受温度的影响, 因此, 在梯形梁试验中, 混合料表现出更小的模量和

更大的相位角, 且对频率(温度)的变化更加敏感。主曲线移位因子 $\lg \alpha_T$ 见表 2。

移位因子 $\lg(\alpha_T)$ 是温度的函数, 因此, 移位因子反映了材料的温度敏感性。从表 2 可以看出: 除了个别移位因子外, 使用 SBS 改性沥青的混合料移位因子比使用基质沥青的要小, 说明 SBS 改性剂改良了沥青的温度敏感性, 提高了材料的高温稳定、中温抗疲劳和低温抗裂性能。

2.2 2 种试验模式下的动态模量转换

根据参考温度 20 °C 的主曲线, 采用二阶多项式进行回归, 将 4 种沥青混合料的动态模量进行数值转换, 建立 2 种试验方法所得动态模量的关系, 见表 3。从表 3 可以看出: 二次方程拟合的相关性系数均在 0.999 以上, 2 种试验方法得到的动态模量之间存在良好的相关关系。

3 试验方法比较与评价

梯形梁和 SPT 试验方法分别是 2 点弯曲和单轴压

缩模式的典型代表。梯形梁的优点是: 弯-剪受力比较符合路面的实际状况; 应变水平控制方便, 应变范围大; 一组试件包含 2 根或者 4 根梯形梁, 试验进度快。其缺点是: 试件制作、固定过程复杂, 回收底座时使用高温灼烧使黏结剂融化, 耗时耗能; 设备无法进行低频加载。

SPT 的优点是: 操作过程简单; 频率范围广, 分布均匀合理; 可根据需要施加围压。其缺点是: 无法精确控制荷载水平; 试件制作比较繁琐, 一般不能直接路面取芯, 难以直接指导实际工程。

综合对比 SPT 和梯形梁动态模量试验发现不同的加载方式对沥青混合料的动态模量和相位角有较大影响。分析动态模量主曲线可知: 两者的动态模量主曲线走势一致, 模量稍有差异, 梯形梁的动态模量略小; 梯形梁试验不能进行低频率加载, 从而导致主曲线频域较窄, 但可以通过曲线拟合的方式得到低频率加载的动态模量主曲线。梯形梁的动态模量对频率更加敏感, 随频率降低, 其下降速度更快。在高频(低温)下, 加载方式对动态模量的影响较小, 单轴压缩与两点弯曲模式下的动态模量较接近; 在低频(高温)下, 加载

表 2 主曲线移位因子 $\lg \alpha_T$

Table 2 Shift factor $\lg \alpha_T$ of master curve

试验方式	混合料类型	温度/°C						
		5	10	15	20	25	30	40
梯形梁	70#SAC16-35	1.770 9	1.155 1	0.570 2	0	-0.568 9	-1.117 4	-1.972 1
	70#SAC16-55	1.836 8	1.180 7	0.578 1	0	-0.549 8	-1.062 0	-1.945 3
	SBS-SAC16-35	1.807 0	1.147 5	0.551 7	0	-0.507 0	-0.979 0	-1.823 0
	SBS-SAC16-55	1.816 1	1.162 7	0.560 0	0	-0.529 9	-1.020 4	-1.895 9
SPT	70#SAC16-35	2.088 9	1.358 4	0.686 2	0	-0.647 4	-1.192 6	-2.256 3
	70#SAC16-55	2.150 8	1.390 2	0.670 0	0	-0.673 9	-1.224 8	-2.271 6
	SBS-SAC16-35	2.063 3	1.340 0	0.670 1	0	-0.645 8	-1.150 6	-2.190 1
	SBS-SAC16-55	2.070 2	1.337 7	0.639 5	0	-0.626 0	-1.320 4	-2.340 7

表 3 梯形梁与 SPT 动态模量转换关系

Table 3 Relationship of dynamic modulus between trapezoid beam test and SPT

混合料类型	二次方程拟合回归公式	样本量/个	R^2
70#SAC16-35	$y=0.300 5x^2-0.686 3x+1.537 6$	10	0.999 6
70#SAC16-55	$y=0.282 9x^2-0.472 0x+0.959 7$	10	1.000 0
SBS-SAC16-35	$y=0.065 9x^2+1.008 9x-1.437 7$	10	0.999 9
SBS-SAC16-55	$y=-0.119 3x^2+2.422 0x-4.035 2$	10	0.999 9

表中: x 为 SPT 动态模量; y 为梯形梁动态模量; R^2 为拟合度。

方式对动态模量的影响较大,单轴压缩与两点弯曲模式下的动态模量差别较大。

分析相位角主曲线可知:梯形梁的相位角偏大,且频域较小的不足仍然存在;梯形梁的相位角对频率(温度)更加敏感,随频率(温度)的变化显著;SPT的相位角主曲线更加平缓、完整。

通过对比试验结果可知:加载方式对动态模量有着显著影响,梯形梁和 SPT 试验方法各有优缺点,应该根据路面结构特点选择合理的试验方法;在路面结构中,各结构层的应力状态随着路面结构和位置的不同而不同,一般而言,路面结构层上部主要受压,下部主要受弯拉,中部为拉压转换,因此,在路面结构设计和材料比选过程中,建议采用相应的试验方法进行动态模量试验,得到的力学参数更接近实际情况,从而使路面结构和材料设计得到优化。

4 结论

1) 梯形梁试验方法的试验频率较高,为 10~40 Hz。无论是动态模量还是相位角的主曲线频域都比较窄;通过调整偏心转子可以方便而精确地控制应变水平。

2) SPT 试验方法频率范围为 0.01~25 Hz,得到的主曲线频域较广,形状平缓完整,但不能精确控制荷载。

3) 梯形梁试验方法和 SPT 试验方法得到的主曲线趋势一致,都能正确反映沥青混合料的动力学特征;梯形梁得到的动态模量更小,相位角更大,说明梯形梁试验的加载模式对试件更不利;梯形梁主曲线的斜率更大,说明弯曲作用下动态模量和相位角对频率(温度)更加敏感;加载方式对动态模量和相位角的影响程度随着频率降低(温度上升)而增大。这 2 种试验方法得到的动态模量存在良好的转换关系。

4) 通过掺加 SBS 改性剂,可以增加沥青混合料的动态模量,减小相位角,改善沥青混合料的高低温性能从而改善其路用性能。

参考文献:

- [1] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的黏弹力学原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 6-8.
ZHANG Xiaoning. Viscoelastic mechanics principle and application of asphalt and asphalt mixtures[M]. Beijing: China Communication Press, 2006: 6-8.
- [2] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 160-164.
SHEN Jinan. Asphalt and asphalt mixture pavement performance[M]. Beijing: China Communication Press, 2001: 160-164.
- [3] 韦金城, 崔世萍, 胡家波, 等. 沥青混合料动态模量试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6): 657-661.
WEI Jincheng, CUI Shiping, HU Jiabo, et al. Research on dynamic modulus of asphalt mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(6): 657-661.
- [4] 钱振东, 杨宇明, 陈团结, 等. 低速与变速动载作用下沥青路面动力响应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 1140-1146.
QIAN Zhendong, YANG Yuming, CHEN Tuanjie, et al. Dynamic response of asphalt pavement under moving loads with low and variable speed[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 1140-1146.
- [5] 罗桑, 钱振东, HARVEY J. 环氧沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 16-20.
LUO Sang, QIAN Zhendong, HARVEY J. Research on dynamic modulus for epoxy asphalt mixtures and its master curve[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 16-20.
- [6] 姚波, 程刚, 王晓. 基于弯曲试验模式的环氧沥青混合料动态模量[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(3): 597-600.
YAO Bo, CHENG Gang, WANG Xiao. Dynamic modulus of epoxy asphalt mixture based on bending test mode[J]. Journal of South East University (Natural Science), 2011, 41(3): 597-600.
- [7] 马林, 张肖宁, 陈少幸. 基于间接拉伸试验模式的沥青混合料动态模量[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 86-91.
MA Lin, ZHANG Xiaoning, CHEN Shaoxing. Dynamic modulus of asphalt mixtures based on indirect tension mode[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2008, 36(10): 86-91.
- [8] 刘宇. 基于半圆弯曲试验的沥青混合料动态响应及断裂性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2009: 3-7.
LIU Yu. Research on dynamic response and fracture performance based of asphalt mixture on semi-circular bending test[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. School of Transportation Science and Engineering, 2009: 3-7.
- [9] UNDERWOOD S B, KIM R Y. Viscoelastoplastic of Continuum damage mode for asphalt concrete in tension[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(11): 732-739.
- [10] 王旭东, 沙爱民, 许智宏. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 102-106.
WANG Xudong, SHA Aimin, XU Zhihong. Dynamics characteristics and dynamic parameters of asphalt pavement

- materials[M]. Beijing: China Communications Press, 2002: 102-106.
- [11] ZHANG Lei, WANG Xudong, ZHOU Xingye, et al. Laboratory evaluation of dynamic complex modulus for hma with varying asphalt content[C]// Geotechnical Special Publication No. 212: Pavements and Materials, ASCE. Changsha, China, 2011: 240-249.
- [12] 李强, 李国芬, 王宏畅. 受力模式对沥青混合料动态模量的影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 816-822.
LI Qiang, LI Guofen, WANG Hongchang. Effect of loading modes on dynamic moduli of asphalt mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 816-822.
- [13] 马林, 张肖宁. 间接拉伸与单轴压缩模式沥青混合料动态模量比较分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 11-17.
MA Lin, ZHANG Xiaoning. Comparison of HMA dynamic moduli between indirect tension and uniaxial compression test modes[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 11-17.
- [14] WITCZAK, M. Simple performance tests: summary of recommended methods and database[R]. Washington D C: NCHRP-547, Transportation Research Board, 2005: 2-7.
- [15] 沙庆林. 重载交通长寿命半刚性路面设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 200-203.
SHA Qinglin. The design and construction of long life semi rigid pavement for heavy traffic with heavy wheel-load[M]. Beijing: People's Communication Press, 2011: 200-203.
- [16] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
JTG E20—2011, Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S].
- [17] 法国 RST“沥青混合料的设计”工作组. 法国沥青混合料设计指南[R]. 南京: 法国 RST“沥青混合料的设计”工作组, 2010: 24-25.
Work Group of France RST Asphalt Mixtures Design. A guide of france asphalt mixtures design[R]. Nanjing: Work Group of France RST Asphalt Mixtures Design, 2010: 24-25.
- [18] 赵延庆, 吴剑, 文健. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J]. 公路, 2006(8): 163-166.
ZHAO Yanqing, WU Jia, WEN Jian. Determination and analysis of dynamic modulus of asphalt mixture and its master curve[J]. Highway, 2006(8): 163-166.
- [19] 马翔, 倪富健, 陈荣生. 沥青混合料动态模量试验及模型预估[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 35-39.
MA Xiang, NI Fujian, CHEN Rongsheng. Dynamic modulus test of asphalt mixture and prediction model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 35-39.
- [20] 刘朝晖, 张景怡, 周婷, 等. 路面黏层复合改性沥青材料研发与性能评价[J]. 材料导报, 2014, 28(2): 134-139.
LIU Zhaohui, ZHANG Jingyi, ZHOU Ting, et al. Development and performance evaluation of composite modified asphalt material for tact coat[J]. Materials Review, 2014, 28(2): 134-139.

(编辑 陈灿华)