

文章编号:1671-1637(2015)03-0001-08

## 沥青混合料动态模量试验标准研究

徐志荣<sup>1,2</sup>, 常艳婷<sup>1</sup>, 陈忠达<sup>1</sup>, 孙建<sup>1</sup>, 刘芸<sup>3</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 延安市新区投资开发建设有限公司, 陕西 延安 716000; 3. 陕西省公路局, 陕西 西安 710068)

**摘要:**以国外研究成果和经验为基础,采用无侧限抗压测试方法测定沥青混合料的动态模量,对静压成型试件的空隙分布不均匀性进行了验证,对试件制作方法进行了改进,得到了静压成型切割试件,并对2种试件的空隙率进行对比分析。根据Vander Poel公式,确定了荷载频率。采用有间隙的加载模式,以试样达到稳态振动为基本原则确定了荷载循环作用次数,并以最后5次的平均应变峰值计算动态模量。确定了荷载级位与应变测量方式,并选取处于稳定期的试验数据作为最终的试验结果。测试了静压成型切割试件的动态模量,计算了动态模量均值、均方差与变异系数。分析结果表明:静压成型切割试件的空隙率平均为4.2%,远小于静压成型试件的空隙率平均值6.5%,而且离散性较小,试件空隙分布均匀,较静压成型试件更接近马歇尔试件的空隙率,且在荷载作用下更容易达到稳定状态;Haversine荷载波形、10 Hz荷载频率、0.9 s荷载作用间隙时间和0.7 MPa荷载级位较接近行车荷载的作用;采用顶面法测量试件变形;当荷载作用次数为200次时,认为试件已达到稳态振动,所以荷载循环作用次数取200次;对于单个试件,选取第3~5次的试验数据计算其动态模量,如第5次与第3次试验动态模量差值大于等于200 MPa,应将试件废弃;3种沥青混合料动态模量为1 650~2 970 MPa,试验结果离散性较小,均方差为100~230 MPa,变异系数为5%~9%,可见,试验方法可行。

**关键词:**路面材料;沥青混合料;动态模量;试验标准;荷载;应变

**中图分类号:**U414.75

**文献标志码:**A

## Study on test standard of asphalt mixture dynamic modulus

XU Zhi-rong<sup>1,2</sup>, CHANG Yan-ting<sup>1</sup>, CHEN Zhong-da<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Highway Engineering for Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Yan'an New City Investment and Development Construction Co., Ltd., Yan'an 716000, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Highway Bureau, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the foreign research achievements and experience, the dynamic modulus of asphalt mixture was measured by using unconfined compressive strength test method. The uneven distributions of static pressing specimens were verified, the making method of specimens was improved, and the cutting static pressing specimens were obtained. The porosities of 2 kinds of specimens were compared. According to Vander Poel formulas, load frequency was determined. The clearance loading mode was used, and the load cycle was determined based on the principle of specimens reaching steady vibration state. Dynamic modulus was calculated according to the average peak strains of last 5 load cycles. The load levels and strain measurement

收稿日期:2015-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51408044)

作者简介:徐志荣(1976-),男,陕西志丹人,延安市新区投资开发建设有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,从事路面工程研究。

导师简介:陈忠达(1956-),男,江苏无锡人,长安大学教授,工学博士。

methods were determined, and the test data at stable phase were selected as the final test results. The dynamic moduli of cutting static pressing specimens were tested, and the mean value, mean square deviation and variation coefficient of dynamic moduli were calculated. Analysis result indicates that the average porosity of cutting static pressing specimens is 4.2%, and is far less than the average porosity of static pressing specimens, which is 6.5%. The discrete of cutting static pressing specimens is small, and the void distribution is uniform. Compared with static pressing specimens, the porosities of cutting specimens are closer to Marshall specimens, and the cutting specimens are easier to reach steady vibration state under loading. Haversine wave, load frequency of 10 Hz, load clearance time of 0.9 s and load level of 0.7 MPa are closer to the roles of traffic loads. The top surface method is used to measure the deformation of specimens. The specimens have reached steady vibration state when the load cycles is 200 times, so the load cycles is determined as 200 times. For a single specimen, the test data of 3-5 load cycles are selected to calculate dynamic modulus. When the difference between the dynamic modulus of 3 and 5 load cycles is no less than 200 MPa, the specimens should be discarded. The dynamic moduli of the 3 kinds of asphalt mixtures are 1 650-2 970 MPa, and the discrete is small. The mean square deviations of dynamic moduli are 100-230 MPa, the variation coefficients of dynamic moduli are 5%-9%, so the method is feasible. 6 tabs, 7 figs, 20 refs.

**Key words:** pavement; asphalt mixture; dynamic modulus; test standard; load; strain

**Author resumes:** XU Zhi-rong(1976-), male, senior engineer, doctoral student, +86-29-82335657, xzhr1976@163.com; CHEN Zhong-da(1956-), male, professor, PhD, +86-29-82335657, 0292335657@163.com.

## 0 引 言

目前,中国沥青路面设计基于弹性层状体系理论,采用静态模量参数,而行驶的车辆对路面施加的是动态荷载,沥青路面结构在动态荷载和静态荷载下具有截然不同的力学性状。动态模量是在特定的加载方式与一定的加载频率下的动态响应,能反映路面的受力状态,因此,有关动态模量的研究对于路面结构设计具有非常重要的意义。目前,国内外学者对沥青混合料动态模量进行了一系列研究: Birgisson 等提出路面结构设计的基本输入参数之一的动态模量<sup>[1-3]</sup>; 肖晶晶等利用 SPT 简单性能试验机对水泥乳化沥青混合料的动态模量和相位角进行了测试,得到了水泥乳化沥青混合料的动态模量主曲线方程,对比了水泥乳化沥青混合料与普通热拌沥青混合料的动态模量特性,通过微观形貌观察对水泥乳化沥青混合料的动态模量特性进行了解析,发现水泥乳化沥青混合料温度敏感性较热拌沥青混合料低<sup>[4]</sup>; 赵延庆等利用 SPT 简单性能试验机测量了 SMA13 与 Superpave20 两种沥青混凝土在不同温度和荷载作用频率下的动态模量,分析了温度与荷载频率对动态模量与相位角的影响,根据时间-温度

置换原理,通过非线性最小二乘拟合,确定了 2 种沥青混合料的动态模量主曲线与时间-温度转化因子,并利用相同的时间-温度转化因子形成了相位角主曲线,确定了沥青混合料的粘弹性<sup>[5]</sup>; 李强等采用不同受力模式对 3 种沥青混合料进行动态模量试验,分析了受力模式、围压、应变水平等因素对沥青混合料动态模量主曲线的影响,通过 Fillers-Moonan-Tschoegl 模型与改进的 Sigmoidal 模型建立了沥青混合料移位因子-围压与动态模量-围压之间的函数关系式,发现二次拟合可以消除沥青混合料动态模量主曲线上动态模量极值对移位因子计算模式的依赖,在相同换算频率时,沥青混合料单轴压缩、间接拉伸和四点弯曲动态模量有差别,但三者之间存在较好的线性关系<sup>[6]</sup>; 刘红等采用 SPT 简单性能试验机测试普通 AC-13 型沥青混合料与加入聚酯纤维的 AC-13 型沥青混合料在 3 个温度与 10 个频率下的动态模量,根据时温等效原理,利用 Origin8.0 软件的非线性曲线拟合功能,拟合出这 2 种沥青混合料的动态模量主曲线 Sigmoidal 模型,得出纤维的加入对沥青混合料动态模量的影响,发现在较低温度(5℃)时,纤维的加入使沥青混合料的动态模量降低,在较高温度(45℃)时,纤维的加入使得沥青混合料的动态模

量提高<sup>[7]</sup>;任瑞波等利用基本性能试验系统进行了动态模量试验,分析了温度与加载频率对动态模量和相位角的影响规律,基于时间-温度置换原理确定了动态模量主曲线和移位因子,并采用修正的 Witczak 模型预估稳定型橡胶改性沥青混合料的动态模量,得出稳定型橡胶改性沥青混合料具有更小的低温模量和更大的高温模量,修正的 Witczak 模型可以较好地预测稳定型橡胶改性沥青混合料的动态模量<sup>[8]</sup>。

由以上研究可知,国内外对于动态模量的研究已经取得了一定的成果,但是各国室内动态模量试验方法不尽相同,尚未建立统一的动态模量试验标准。基于此,本文从试件制作、试验荷载、应变测量方式与试验数据处理等方面展开研究,建立了系统的、适用性更广的沥青混合料标准试验方法。

## 1 试验方案与试验材料

高速公路沥青面层常采用 AC-13 型沥青混合料作上面层,AC-20 型沥青混合料作中面层,AC-25 型沥青混合料作下面层,而且 AC-13 型和 AC-20 型沥青混合料也常用于二级公路。本文以中国常用的 AC-13、AC-20 和 AC-25 型沥青混合料为对象进行试验,级配采用规范推荐级配的中值,通过集料的筛分、回配得到。

无侧限抗压测试方法和间接抗拉测试方法为各国应用较为普遍的 2 种测试沥青混合料动态模量的方法,由于间接抗拉测试中试件的变形较为复杂,且试件横向变形测量较为困难,而且中国沥青混合料静态模量也均采用无侧限抗压测试方式测定,因此,本文采用中国常用的无侧限抗压测试方式测定沥青混合料的动态模量。

试验材料包括沥青、粗细集料和矿粉。AC-13 型沥青混合料主要用于沥青上面层,故采用酸性的安山岩集料;AC-20、AC-25 型沥青混合料主要用于沥青中面层与下面层,故采用碱性的石灰岩集料;选用 2 种沥青,分别为 SK 和 ESSO 沥青。原材料的各项技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求。

3 种沥青混合料的技术性能见表 1,可以看出 3 种沥青混合料的技术性能均满足规范要求。

## 2 试件制作方法

结合中国的国情与设备的普及情况,试件一般采用静压法成型,但是静压成型试件存在一定缺陷,如因装料不均与细集料向下迁移,致使试件中集料

表 1 沥青混合料技术性能

Tab. 1 Technical performances of asphalt mixtures

沥青混合料 类型	沥青 品种	油石比/ %	稳定度/ kN	空隙率/ %	流值/ mm	间隙率/ %	饱和度/ %
AC-13	SK	4.7	8.8	5.0	3.8	14.0	65
	ESSO	4.7	8.3	3.2	3.2	13.3	65
AC-20	SK	4.2	9.3	3.5	3.4	12.4	72
	ESSO	4.2	10.1	3.5	3.8	12.8	73
AC-25	SK	3.7	12.6	4.0	3.0	12.0	65
	ESSO	3.7	10.2	4.8	3.2	13.0	63

和空隙分布不均匀,上下两端的空隙率较大,相对而言,中间部分集料和空隙率分布较为均匀。以下试验对静压成型试件的空隙分布不均匀性进行了验证。

将静压法成型的直径与高度均为 100 mm 的标准圆柱体试件,分为上、中、下 3 部分,分别按《压实沥青混合料密度试验(表干法)》(T0705—2000)测定试件各部位的空隙率,结果见表 2。

表 2 静压成型试件不同部位的空隙率

Tab. 2 Porosities of different parts of static pressing specimens

部位	不同类型试件的空隙率/%		
	AC-13	AC-20	AC-25
上	7.8	6.9	6.9
中	6.1	5.6	5.6
下	7.2	6.2	6.2

试验结果表明:AC-13、AC-20、AC-25 试件的中上层空隙率差分别为 1.7%、1.3%、1.3%,平均为 1.43%,标准差为 0.23%;3 种试件中下层空隙率差分别为 1.1%、0.6%、0.6%,均值为 0.77%,标准差为 0.24%;试件中间部位的空隙率较小,平均为 5.80%,上下两端的试件空隙率分别平均为 7.20%、6.50%。由切开的试件断面也可以看出中间部位试件的集料和空隙分布比较均匀。

另外,静压成型试件的表面粗糙不平,会引起模量试验过程中变形测定的误差。为此,对试件制作方法进行改进。中国现行沥青混合料静态模量测试中采用的试件直径一般为 100 mm,高径比为 1:1。考虑到试验方法的延续性与试验数据的可比性,动态模量试验同样采用直径为 100 mm、高径比为 1:1 的试件。从中国沥青面层各层的厚度、施工压实和路面结构受力情况来看,采用这种尺寸的试件是合理的。为了克服静压成型试件的弊端,减小对试验结果准确性的影响,首先采用静压法成型直径为 100 mm、高度为 160 mm 的试件,然后将试件两端各切除 30 mm,形成直径与高度均为 100 mm 的试件。切割过程中

应用夹具将试件牢牢夹住且连续切割完成,切割后的试件用金刚石进行打磨,以保证上下 2 个切割面相互平行且光滑<sup>[9-11]</sup>。

表 3 为静压成型切割试件和静压成型试件(未经切割的原始试件)的空隙率测试结果,并与马歇尔试件的空隙率进行对比。

表 3 不同方法成型的试件空隙率

Tab. 3 Porosities of specimens using different forming methods

试件类型		AC-13 试件			AC-20 试件			AC-25 试件		
		静压成型 切割试件	静压成型 试件	马歇尔试件	静压成型 切割试件	静压成型 试件	马歇尔试件	静压成型 切割试件	静压成型 试件	马歇尔试件
空隙率/ %	试件 1	4.6	6.5	4.8	3.8	6.4	3.6	4.2	7.0	4.1
	试件 2	4.4	6.4		3.7	6.0		4.2	7.1	
	试件 3	4.8	6.7		3.9	6.0		4.3	6.9	
均值/%		4.6	6.5		3.8	6.1		4.2	7.0	
方差/%		0.129	0.538		0.054	0.141		0.054	0.436	

由表 3 可以看出:3 种类型的静压成型切割试件的空隙率平均为 4.2%,远小于静压成型试件的 6.5%,而且离散型也较小,AC-13、AC-20、AC-25 静压成型切割试件的方差分别为 0.129%、0.054%、0.054%,远小于静压成型试件的方差;静压成型切割试件的空隙率与马歇尔试件的空隙率比较接近,说明对静压成型试件进行切割处理可有效克服静压成型的不足,使试件的均匀性更好。

### 3 试验荷载确定

#### 3.1 荷载波形

行车动载一般可由简谐半正弦波形、三角波形与 Haversine 波形等描述。沥青混合料动态模量与荷载波形有很大关系,一般认为 Haversine 波形比较接近路面所承受的行车荷载波形,而且 Haversine 波形荷载易于实现,国外动态模量试验基本上均采用 Haversine 波形。考虑到试验的可操作性和简易性,建议动态模量试验采用 Haversine 波形,其表述形式为

$$F = \frac{q}{2} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (1)$$

式中: $F$  为行车荷载; $q$  为振幅; $f$  为荷载频率; $t$  为荷载作用时间。

为避免长时间试验可能出现的试件脱空现象,而对试件产生冲击作用,对 Haversine 波形设置最小荷载,数值为最大荷载的 2%。在正式测试前,应以最小荷载对试件进行预加载,以使各部位保持良好接触。

#### 3.2 荷载频率

对于室内小型试验,行车荷载的作用时间可以根据 Vander Poel 的公式来确定

$$t = \frac{1}{2\pi f} \quad (2)$$

参考 AASHTO 关于行驶速度与加载时间的计算公式,结合中国现行的《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)规定,高速公路、一级公路和二级公路的设计行驶速度为 60~120 km·h<sup>-1</sup>,相应的行车荷载作用时间为 0.025~0.050 s,将其代入式(2)中,可得荷载频率范围为 6~15 Hz。当荷载频率为 10 Hz 时,荷载作用时间约为 0.016 s,对于沥青路面而言,相当于 60~65 km·h<sup>-1</sup> 的行驶速度,因此,荷载频率为 10 Hz 是可行的<sup>[12]</sup>。

另一方面,试验中采用的荷载频率还应考虑材料特性和试验设备。目前,国内外动态模量试验中,MTS 仪大多采用伺服液压加载系统,属于低频动态试验仪器,有效频率为 20~30 Hz,如果试验频率过高,必然造成较大的系统误差,而对于黏性较大或变形较大的材料(如沥青材料),试验频率应更低,以保证试验的可靠性<sup>[13]</sup>。综合以上分析,建议动态模量试验采用 10 Hz 的荷载频率。

#### 3.3 荷载作用间隙时间

荷载作用间隙时间是 2 次荷载作用周期期间的休息时间,也可理解为路面上某一点依次通过 2 辆车的时间间隔。对于荷载作用间隙时间,国外研究中通常采用 2 种模式:不考虑荷载作用间隙时间(即无间歇的连续加载模式)和考虑荷载作用间隙时间(即荷载作用有间隙的加载模式)。这 2 种模式考虑问题的角度不同,前者主要反映稳态振动作用下材料的动态响应,后者主要反映每次荷载作用对材料性状的影响<sup>[14-15]</sup>。目前,国外动态模量试验一般考虑一定的间隔时间,间隔时间为 0.9 s,而且由于车辆行驶有一定间隔,行车荷载对路面的作用不属于连续加载模式。为了突出间歇时间对变形响应的影响,并参考国内外成功经验,最终确定荷载作用间隙

时间为 0.9 s。

3.4 荷载级位

研究表明动态模量随荷载级位的增大而增大。中国沥青路面结构设计以 100 kN 为标准轴载,相应的轮胎压应力为 0.7 MPa。因为动态模量是为路面结构设计服务的,为此建议荷载级位为 0.7 MPa,这样可更好地模拟作用于沥青路面上的实际行车荷载。

3.5 荷载循环作用次数

荷载循环作用次数以试件达到稳态振动为基本原则来确定<sup>[16]</sup>。试件应变随荷载作用时间(间接反映荷载循环作用次数)的增量见表 4,其中 AC-13 静

压成型切割试件与静压成型试件应变随荷载作用时间变化规律见图 1。图 2 为 AC-13 静压成型切割试件的应变振动曲线。试验结果表明:随荷载作用时间的延长,静压成型试件应变增幅较大,为静压成型切割试件应变增幅的 3~5 倍,而且振动达不到稳定状态,原因为静压成型试件表面不够致密,在振动下蠕变现象较为严重,所以随荷载作用时间的延长应变不断增加,难以达到稳态振动;静压成型切割试件在最后 25 次荷载作用下应变增量最大为 0.000 06,认为此时试件振动已达稳定状态,因此,荷载循环作用次数取 200 次,并且以最后 5 次的平均应变峰值来计算动态模量。

表 4 不同荷载作用时间的应变增量  
Tab. 4 Strain increments of different load times

混合料类型		不同荷载作用时间的应变增量							
		10.0~12.5 s		12.5~15.0 s		15.0~17.5 s		17.5~20.0 s	
		峰值	谷值	峰值	谷值	峰值	谷值	峰值	谷值
AC-13	静压成型切割试件	0.000 13	0.000 14	0.000 11	0.000 13	0.000 11	0.000 08	0.000 06	0.000 06
	静压成型试件	0.000 45	0.000 43	0.000 51	0.000 44	0.000 44	0.000 43	0.000 35	0.000 33
AC-20	静压成型切割试件	0.000 13	0.000 12	0.000 09	0.000 08	0.000 07	0.000 08	0.000 04	0.000 04
	静压成型试件	0.000 34	0.000 33	0.000 31	0.000 28	0.000 25	0.000 28	0.000 23	0.000 23
AC-25	静压成型切割试件	0.000 10	0.000 08	0.000 08	0.000 07	0.000 06	0.000 07	0.000 06	0.000 06
	静压成型试件	0.000 30	0.000 24	0.000 29	0.000 23	0.000 24	0.000 23	0.000 13	0.000 15

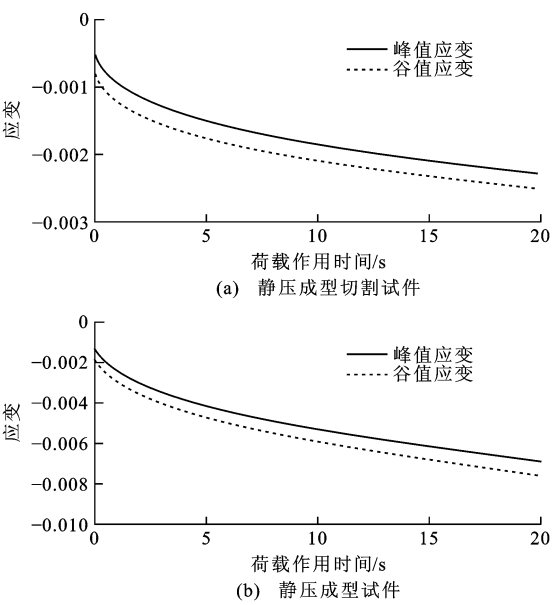


图 1 AC-13 试件应变曲线  
Fig. 1 Strain curves of AC-13 specimens

由图 2 可以看出:在荷载作用下静压成型切割试件的应变随着荷载作用次数的增加而增加,但增加幅度逐渐减小,当荷载作用次数接近 200 次时,应变变化较小,此时认为已经达到稳态振动。

鉴于沥青混合料的蠕变特性,荷载循环作用次数不宜太大,一般情况下,荷载频率较低时,循环作用次数宜小,反之宜适当增大。考虑到试验标准的全面性,研究不同荷载频率下适宜的荷载循环作用次数,通过对比试验分析,建议不同荷载频率下的荷载循环作用次数见表 5。

表 5 荷载循环作用次数建议值  
Tab. 5 Recommended values of load cycles

荷载频率/Hz	1	5	10	15	20
荷载循环作用次数	100	100	200	200	200

4 应变测量与试验数据处理方法

4.1 应变测量方式

目前,应变测量方式主要有 2 种:顶面法与侧面法。侧面法由于繁琐的环节极易导致较大的测试误差,而且操作性差,试件的非均匀性也易导致试件在外荷作用下在非测试范围内产生均匀变形等问题,这种测试方法不能反映材料的整体变形性能,而且测得的变形比实际变形小,从而使得模量测试值偏大<sup>[17-18]</sup>。鉴于侧面法测得的数据离散性较大这一事实,建议采用顶面法测量试件变形。顶面法不仅可

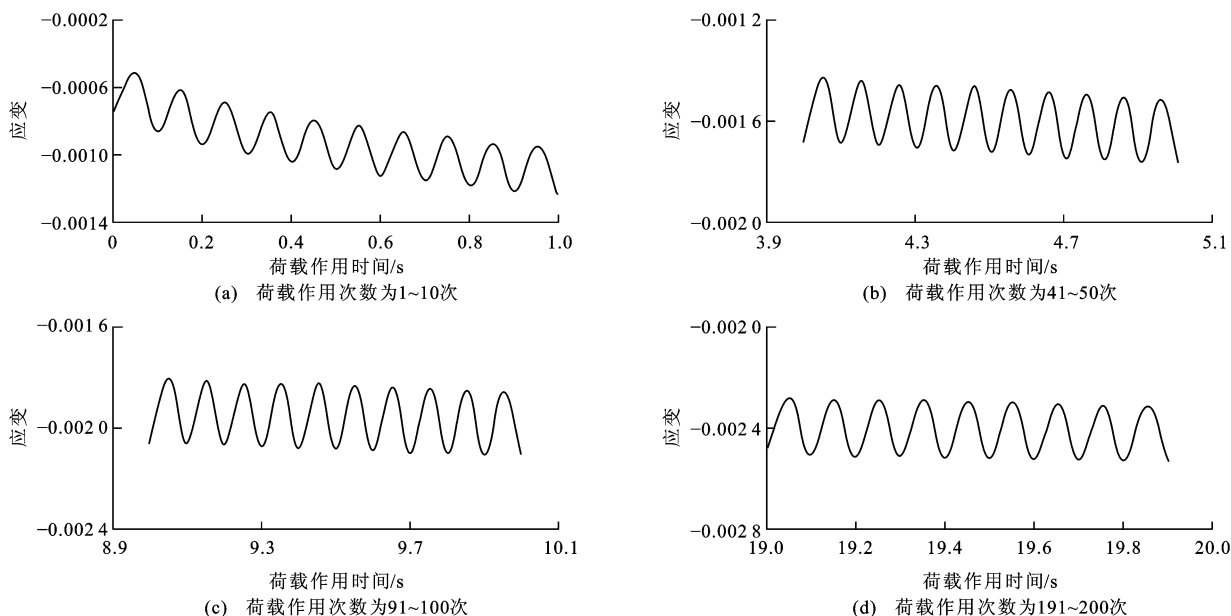


图 2 AC-13 静压成型切割试件应变振动曲线

Fig. 2 Strain vibration curves of AC-13 cutting static pressing specimens

以克服侧面法上述不足,降低试验操作难度,同时可以保持与静态模量试验方法的一致性,便于探究动态模量与静态模量的关系。

#### 4.2 试验数据处理方法

为了最大限度反映材料的真实特性,在不减少试验数量的基础上,对试验数据处理方法进行探讨。在荷载级位为 0.7 MPa,荷载频率为 10 Hz 的试验条件下,分别对 3 种沥青混合料试件进行 10 次独立的动态模量试验,每次试验时间间隔为 30 s,其中 AC-25 静压成型切割试件的动态模量试验结果见图 3。

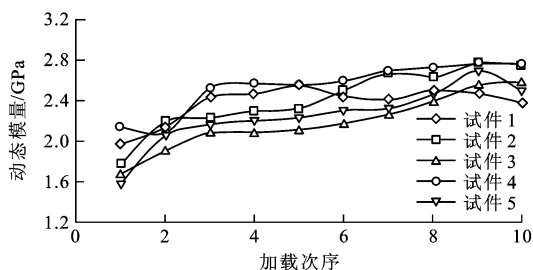


图 3 动态模量变化曲线

Fig. 3 Changing curves of dynamic moduli

由图 3 可以看出:对于 AC-25 试件来说,随着试验次数的增加,其动态模量一开始逐渐增大,且前 3 次动态模量变化幅度较大。AC-20 试件的最大增幅为 970 MPa, AC-25 试件的最大增幅为 580 MPa。第 3~5 次动态模量变化幅度降低,第 5 次加载以后,随加载次数的持续增加,变化逐渐缺乏规律,这种现象的主要原因如下:试件在首

次加载时受到一定冲击作用,变形偏大,产生了虚假变形,此时,各个试件的动态模量存在较大差异;试件在荷载作用下逐渐被压密,变形逐渐减小,从而动态模量变大但变化变小。研究表明试件在经过多次荷载作用后,抗压强度逐渐增大但抗拉强度减小<sup>[19-20]</sup>。

根据 3 种沥青混合料的试验结果,总结了试件在荷载作用下的状态变化规律,见表 6。为了使试验结果更真实反映材料的性质,选取处于稳定期的试验数据作为最终的试验结果,即对于单个试件,应选取第 3~5 次的试验数据来计算其动态模量。也存在有些试件在制作时有损伤从而没有明显稳定期的现象,一般当第 5 次与第 3 次试验动态模量的差值大于等于 200 MPa 时,认为试件没有出现稳定期,表明试验失败。

表 6 沥青混合料状态变化规律

Tab. 6 Changing rule of asphalt mixture state

时期	虚假期	稳定期	应力加强期
动荷作用次数	1~2	3~5	>5

综上所述,动态模量试验数据按以下原则处理:由单个试件稳定期的试验值来计算沥青混合料的动态模量,如果当第 5 次与第 3 次试验动态模量的差值大于等于 200 MPa 时,应将试件废弃,重新成型试件进行试验。

根据上述试验方法,对 3 种沥青混合料静压成型切割试件进行动态模量试验,具体试验条件为:试验温度为 15 ℃,荷载波形为 Haversine 波形,荷载

频率为 10 Hz,荷载作用间隙时间为 0.9 s,荷载作用次数为 200 次。试验结果见图 4,动态模量均值、均方差与变异系数分别见图 5~7。

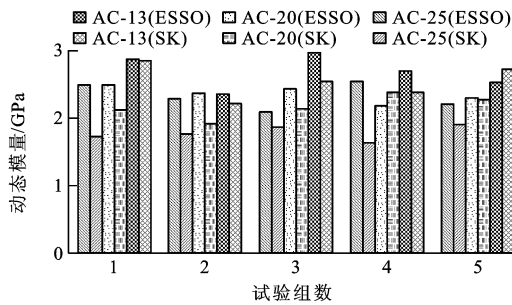


图4 试验结果对比

Fig. 4 Comparison of test results

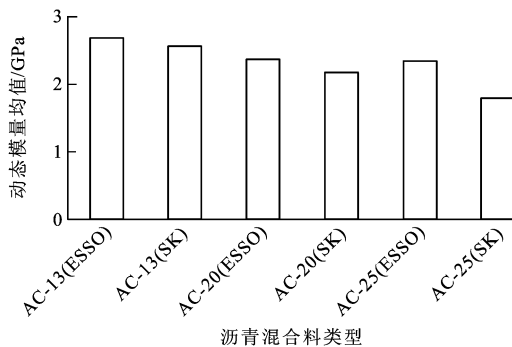


图5 动态模量均值

Fig. 5 Mean values of dynamic moduli

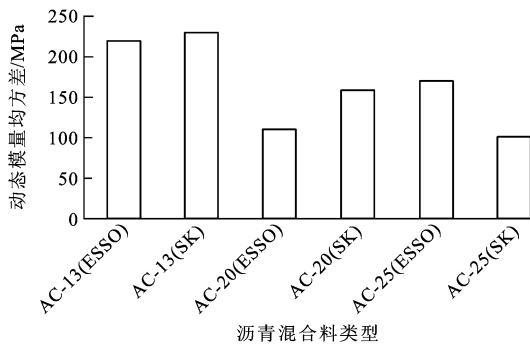


图6 动态模量均方差

Fig. 6 Mean square deviations of dynamic moduli

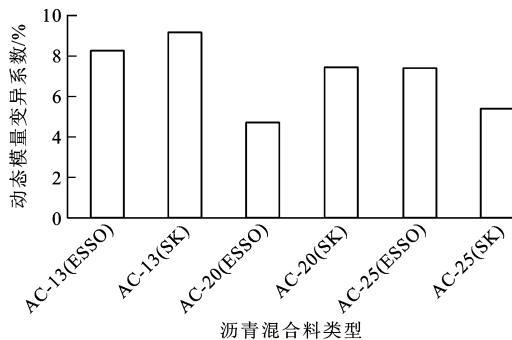


图7 动态模量变异系数

Fig. 7 Variation coefficients of dynamic moduli

由图 4~7 可知,沥青混合料动态模量为 1 650~2 970 MPa,试验离散性较小,其均方差为 100~230 MPa,变异系数为 5%~9%,表明试验方法可行。

## 5 结 语

(1)沥青混合料动态模量试验采用直径与高度均为 100 mm 的试件,由静压成型试件切割形成。静压成型切割试件在荷载作用下易达到稳态振动,试验结果离散性小,而且试件空隙率与马歇尔试件的空隙率相当。

(2)为了防止过高的试验频率致使系统误差,突出荷载作用间隙时间对变形响应的影响,增加试验操作的简易性,同时考虑到沥青混合料的蠕变特性,建议动态模量试验时采用 Haversin 波形的荷载、10 Hz 的荷载频率、0.9 s 的荷载作用间隙时间和 200 次荷载循环作用次数。

(3)稳定期的试验数据更能真实地反映材料的性质,故对于单个试件,应选取第 3~5 次的试验值来计算其动态模量,并以第 5 次与第 3 次试验的动态模量差值不小于 200 MPa 作为试件废弃重新试验的标准。

(4)动态模量试验方法较多,本文仅使用了重复加载法,尚未对敲击振动法和超声波法进行研究,而 3 种方法在各国的标准中都已出现,且适用性各异,所以有必要对其他试验方法进行研究,并得出不同方法的内在联系。

## 参考文献:

## References:

- [1] BIRGISSON B, SORANAKOM C, NAPIER J A L, et al. Microstructure and fracture in asphalt mixtures using a boundary element approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2): 116-121.
- [2] YOU Zhan-ping. Development of a micromechanical modeling approach to predict asphalt mixture stiffness using the discrete element method[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [3] WU Jian-min, LIANG Jia-ping, ADHIKARI S. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 439-447.
- [4] 肖晶晶,沙爱民,蒋 玮,等. 水泥乳化沥青混合料动态模量特性[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 446-450.  
XIAO Jing-jing, SHA Ai-min, JIANG Wei, et al. Dynamic modulus characteristics for cement emulsified asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(3): 446-450. (in Chinese)
- [5] 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): 163-167.
- ZHAO Yan-qing, WU Jian, WEN Jian. Determination and analysis of dynamic modulus of asphalt mixture and its master curve[J]. Highway, 2006(8): 163-167. (in Chinese)
- [6] 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 Guo-fen, WANG Hong-chang. Effects of loading modes on dynamic moduli of asphalt mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 816-822. (in Chinese)
- [7] 刘 红, 孔永健, 曹东伟. 加入聚酯纤维对沥青混合料动态模量的影响[J]. 公路交通科技, 2011, 28(8): 25-29, 45.
- LIU Hong, KONG Yong-jian, CAO Dong-wei. Influence of adding polyester fiber on dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(8): 25-29, 45. (in Chinese)
- [8] 任瑞波, 王立志, 耿立涛. 稳定型橡胶改性沥青混合料动态模量研究[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(4): 283-288.
- REN Rui-bo, WANG Li-zhi, GENG Li-tao. Dynamic modulus research of stabilized rubber modified asphalt mixtures[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2013, 28(4): 283-288. (in Chinese)
- [9] 孙 建. 沥青混合料动态模量研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- SUN Jian. The research of asphalt mixture dynamic modulus[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [10] 羊 明. 沥青混合料动态模量研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- YANG Ming. Research on the dynamic modulus of asphalt mixtures[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 邹会宗. 沥青混合料动态模量试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- ZOU Hui-zong. The experimental research of asphalt mixture dynamic modulus[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [12] 曹 洋, 周 建, 严佳佳. 考虑循环应力比和频率影响的动荷载下软土微观结构研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 735-743.
- CAO Yang, ZHOU Jian, YAN Jia-jia. Study of microstructures of soft clay under dynamic loading considering effect of cyclic stress ratio and frequency[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 735-743. (in Chinese)
- [13] 李德超. 沥青混合料动态模量试验研究[J]. 公路, 2008(1): 134-140.
- LI De-chao. Test and study on dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Highway, 2008(1): 134-140. (in Chinese)
- [14] 李 江, 严二虎. 荷载作用时间对沥青混合料高温稳定性的影响[J]. 公路交通科技, 2013, 30(12): 23-28.
- LI Jiang, YAN Er-hu. Influence of loading time on high temperature stability of asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(12): 23-28. (in Chinese)
- [15] 郭乃胜, 赵颖华, 郭 扬. 单周期荷载作用下纤维沥青路面的动态响应[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(3): 117-121.
- GUO Nai-sheng, ZHAO Ying-hua, GUO Yang. Dynamic response of fiber reinforced asphalt pavement subjected to single period load[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2007, 33(3): 117-121. (in Chinese)
- [16] 王俊梅. 土基回弹模量及其测试方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- WANG Jun-mei. Research on soil base's modulus of resilience and test method[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)
- [17] 陈磊磊, 钱振东. 基于简单性能试验的环氧沥青混合料动态模量研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 341-344.
- CHEN Lei-lei, QIAN Zhen-dong. Study on dynamic modulus of epoxy asphalt mixture based on simple performance test[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 341-344. (in Chinese)
- [18] 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 Zhen-dong, 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. (in Chinese)
- [19] 李晓燕, 平 路, 汪海年, 等. 基于国内外试验方法的橡胶沥青性能测试[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1): 10-17.
- LI Xiao-yan, PING Lu, WANG Hai-nian, et al. Performance test of rubber asphalt based on domestic and abroad test method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 10-17. (in Chinese)
- [20] 郝培文, 李志厚, 杨 黔, 等. 掺加复合聚合物高模量沥青混凝土技术性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(1): 45-50.
- HAO Pei-wen, LI Zhi-hou, YANG Qian, et al. Study on technical performance of high-modulus asphalt concrete mixed with composite polymer electrolyte[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2014, 31(1): 45-50. (in Chinese)