

## 测试方法对沥青混合料动态模量取值的影响

刘胜<sup>1,2</sup>, 刘靖宇<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2.湖南省交通科学研究院有限公司)

**摘要:** 单轴压缩动态模量是沥青路面的重要设计参数,为明确不同测试方法对模量取值的影响,通过试验研究发现: Haversine 波比半正弦波和三角波测得的动态模量高 20%~50%,  $\phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  圆柱体试件测得动态模量比  $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  高 20%~60%; 10 Hz 频率下连续加载方式测得的动态模量比间歇加载高 20%; 对试件端部进行处治能有效削弱端部效应的影响,采用外接传感器进行回弹变形采集精度更高。并建立了两种不同尺寸试件回弹模量之间的线性关系。

**关键词:** 道路工程; 动态回弹模量; 单轴压缩; 加载波形; 试件尺寸; 变形采集

单轴压缩状态的回弹模量是国内外沥青道路的主要设计参数,美国从 20 世纪 70 年代就致力于动态模量的研究,并于 2004 年的 NCHRP 子报告 1-37A 中完成了 Simple Performance Tester(SPT)及其试验方法的研发。采用两点弯曲模式对 T 形梁试件进行动态加载,其试验体系广泛应用于欧洲。与国外相反,中国 1986 版设计规范、1997 版设计规范、2006 版设计规范一直沿用静态回弹模量,到 2017 版设计规范实现了从静到动的转变,并确定以 2011 版试验规程中的单轴压缩试验(T0738)作为动态模量的测试方法。

然而,由于长年静态模量经验累积的主观认知存在差异,加之工地试验仪器达不到要求,在实用中测定动态模量的方法不统一,主要体现在:① 荷载状态,现行规范规定了两种加载波形,但并没有明确不同加载波形带来的差异;② 试件尺寸,规范要求的  $\phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  圆柱体试件成型难度较高,需先 SGC 成型  $\phi 150\text{ mm} \times 170\text{ mm}$  试件,通过切割、钻芯等一系列操作,方可进行测试,相对而言  $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  尺寸试件因其成型简便、用料节约而更受青睐;③ 变形采集方式,过去采集的静态模量数据往往采用千分表等

压强度稳步增长,抗冻性能、抗弯拉性能优良,具有良好的工作性能。

(3) 水泥稳定水泥混凝土类再生材料 7 d 无侧限抗压强度满足高等级公路极重、特重交通基层抗压强度指标要求,抗压强度稳步增长,抗冻性能、抗弯拉性能优良,具有良好的工作性能。

(4) JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》对于沥青路面结构验算变化较大,水泥稳定建筑垃圾再生材料完全满足沥青混合料贯入强度性能验证及疲劳开裂验算要求,建议设计院所及检测公司根据设计规范要求配备相关设备,通过试验确定原材料性能。

### 参考文献:

- [1] JTJ F41-2008 公路沥青路面再生技术规范[S].
- [2] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].

- [3] JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [4] JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S].
- [5] 孙丽蕊,田明阳,梁勇,等.水泥稳定再生骨料无机混合料在道路基层中的应用[J].市政技术,2016(6).
- [6] 张志清,丛铖东,隰文博,等.泡沫沥青冷再生混合料在道路大修工程中的应用研究[J].北京工业大学学报,2014(8).
- [7] 李晓静.建筑垃圾作为基层材料的轻交通量公路路面结构研究[D].西南科技大学硕士学位论文,2013.
- [8] 鲁攀,王明,祝学涛,等.水泥稳定废砖再生集料的路用性能研究[J].中外公路,2016(2).
- [9] TaraLani Cavalline, Recycled Brick Masonry Aggregate Concrete: Use of Recycled Aggregates from Demolished Brick Masonry Construction in Structural and Pavement Grade Portland Cement Concrete[D]. Ph.D Thesis of the University of North Carolina, 2012.

收稿日期:2018-11-30

作者简介:刘胜,男,硕士,E-mail: 491201230@qq.com

观测得到,结果偏主观。

为研究上述不同测试方法间的差异,设计了不同荷载状态、试件状态和数据采集手段的沥青混合料室内试验,以量化测试方法对模量取值的影响。

1 原材料设计

采用 AC13 矿料级配及秦皇岛 SBS I—D 改性沥青作为沥青混合料原料,其级配及混合料常规性能均满足规范要求,分别见表 1、2。

表 1 AC13 级配设计

集料粒径/ mm	质量百分 数/%	集料粒径/ mm	质量百分 数/%
16	0	0.6	4.3
13.2	2.0	0.3	3.5
9.5	37.4	0.15	1.1
4.75	25.8	0.075	1.7
2.36	9.4	矿粉	7.1
1.18	7.7		

表 2 沥青混合料常规性能指标

油石比/ %	稳定度/ kN	空隙率/ %	流值/ mm	间隙率/ %	饱和度/ %
4.7	8.3	3.2	3.2	13.2	65

按照规范 T0738 要求,每组平行试验保证 5 个有效试样,试验温度为 20℃,计算得到 AC13—SBS 沥青混合料在不同测试方法下的单轴压缩动态回弹模量值(以下简称动态模量)。

2 荷载状态对动态模量取值的影响

2.1 加载波形

在国内外相关研究中,应用最多的加载波形主要

有:三角波、半正弦波、半正矢波(Haversine 波)。3 种加载波形下的动态模量如图 1 所示。

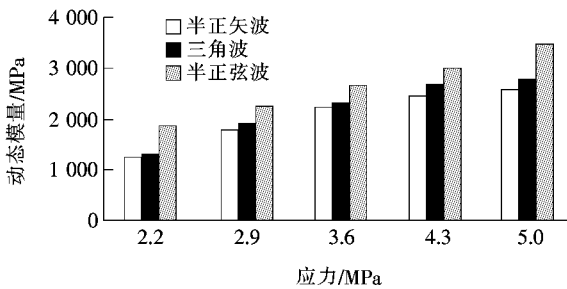


图 1 3 种加载波形动态模量

从图 1 可以看出:三角波与 Haversine 波的动态模量基本相等,而半正弦波的动态模量略大于 Haversine 波和三角波,数值偏高 20%~50%;从能量的角度来看,单个荷载周期内半正弦波对试件施加的荷载能量最大,而 Haversine 波和三角波的荷载能量接近。因此,半正弦波下试件测试得到的动态模量较大,比三角波与 Haversine 波高 20%~50%。

2.2 加载方式

除加载波形外,荷载连续与否也是动态加载必须考虑的问题。已有研究认为,间歇荷载研究的是单次行车荷载对道路结构的影响,而连续荷载研究的是稳定荷载作用下的路面响应状态,间歇加载或者连续加载都有一定理论意义。通常动态加载试验中存在两种加载方式:① 连续荷载;② 间歇荷载。加载 0.1 s,间歇 0.9 s。分别进行 5、10 Hz 频率下两种加载模式的动态模量试验,结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出:各个荷载振幅下连续荷载作用的动态模量比间歇的大。在荷载频率 10 Hz 时这种差别尤为明显,连续荷载下的动态模量比间歇荷载下的动态模量平均大 20%。而在 5 Hz 时仅大 3%左右。由此可见,间歇时间对动态模量的影响与荷载频率有直接关系。当荷载频率较大时,间歇时间的影响比较明显,当荷载频率较小时影响不大。

表 3 荷载间歇对动态模量的影响

应力/ MPa	动态模量/MPa		连续/间歇	动态模量/MPa		连续/间歇
	5 Hz 间歇	5 Hz 连续		10 Hz 间歇	10 Hz 连续	
2.2	1 046	1 047	1.00	1 079	1 276	1.22
2.9	1 581	1 617	1.02	1 619	1 805	1.20
3.6	1 932	1 968	1.02	1 966	2 236	1.19
4.3	2 201	2 280	1.04	2 241	2 460	1.20
5.0	2 284	2 372	1.04	2 322	2 610	1.21

3 试件状态对动态模量取值的影响

3.1 试件尺寸

按照规范 T0738 及 SPT 试验要求,单轴压缩动态模量试验采用  $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  试件进行试验,但作为中国传统路面材料回弹模量的测量方法,习惯采用  $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  尺寸的试件,其原因如下:①大量的室内外对比试验发现, $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  尺寸试件采用顶面法测定的静态模量与施工现场承载板测定的模量数值十分接近;② 试验方法简单,因此仍有不少研究和工程应用采用  $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的试件进行试验。为了明确这两种试件尺寸对动态模量测试结果的影响,分别成型了  $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  和

$\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  试件进行试验,结果见图 2。

在受压过程中,试件端面与上下金属压板之间产生摩擦力,使得试件在受压时端部还受到摩擦力的约束,导致试验结果存在误差(表 4)。由图 2、表 4 可知, $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  试件的动态模量均明显大于  $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  试件,其动态模量值为后者的 1.2~1.6 倍,说明试件尺寸对模量取值的影响较大,为减小端部效应对模量测试的干扰,应采用  $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  圆柱体试件测得的结果作为动态模量标准值。此外,根据表 4 可知,5 Hz 频率对应的动态模量比值高于 10 Hz、轻载荷作用时模量比值稍大于重载荷状态,说明荷载状态也会对端部效应的干扰产生影响,但影响较小。

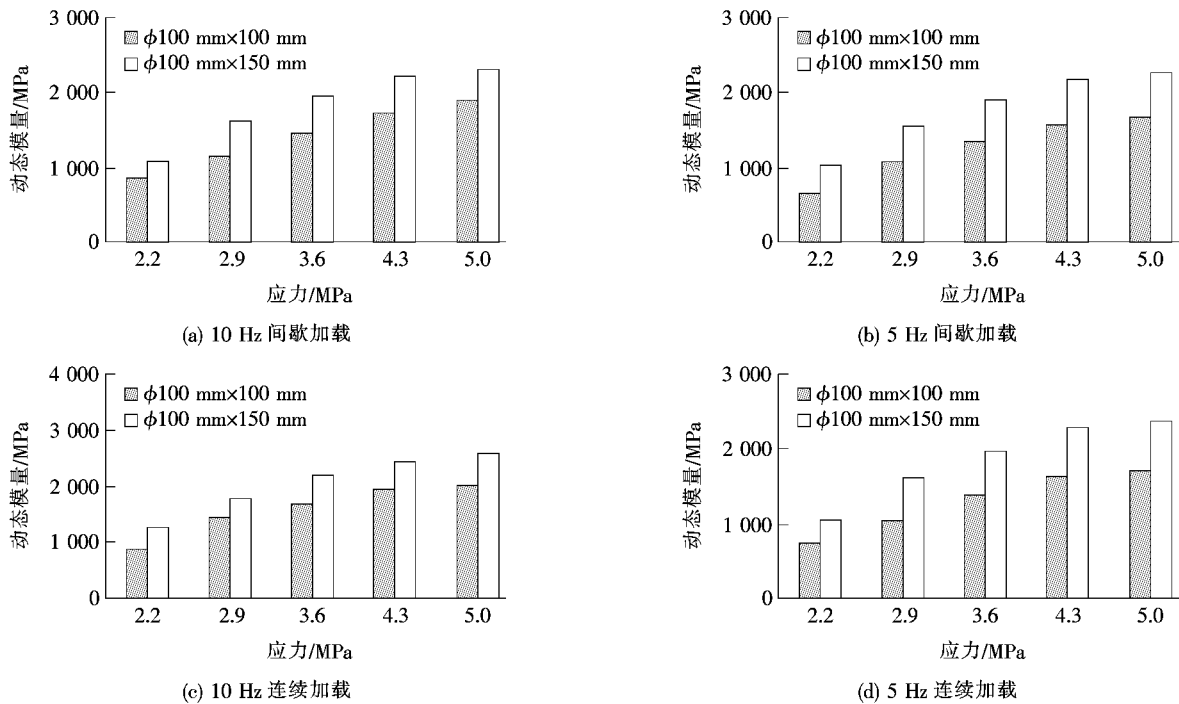


图 2  $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  与  $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  尺寸试件的动态模量的对比

表 4  $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  与  $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  尺寸试件的动态模量比值

加载方式	不同应力(MPa)下 $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 、 $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 试件动态模量比值				
	2.2	2.9	3.6	4.3	5.0
连续 10 Hz	1.44	1.25	1.30	1.25	1.29
连续 5 Hz	1.45	1.57	1.41	1.39	1.39
间歇 10 Hz	1.24	1.40	1.35	1.29	1.23
间歇 5 Hz	1.57	1.46	1.42	1.39	1.36

图 3 为  $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  试件与  $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  试件在不同荷载状态下动态模量的散点图,可见不同荷载状态下的模量取值均在虚线处波动,使得两种尺寸试件模量取值总存在一定的线性关系,如式(1)所示:

$$E_{150}=1.17E_{100}+259$$

(1)

式中: $E_{150}$  和  $E_{100}$  分别为  $\phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  试件和  $\phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  试件的动态模量值(MPa),判定系数  $R^2=0.96$ 。

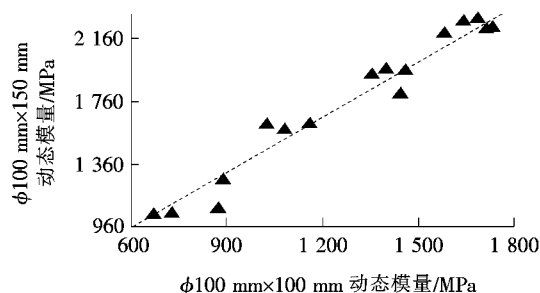


图3 不同试验条件下两种尺寸试件动态模量散点图

### 3.2 试件的端部处治

为了减小端部效应的干扰,国内外相关试验方法中都强调试件端面的平整,现行规范 T0738 建议在试件与压板之间放一层聚四氟乙烯垫片以减小摩擦力(以下简称垫片法);该文考虑了一种端部处治方式,即采用一定比例滑石粉与甘油的混合物涂抹在试件端面,然后用蜡封闭,进行端面处理后再进行抗压试验(以下简称蜡封法)。分别用垫片和蜡封法处治  $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  试件,并与未处治的  $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  试件和  $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  试件进行对比,结果如图4所示。

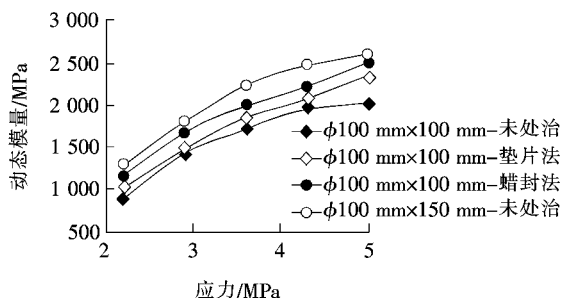


图4 端部不同处治方法测得的动态模量变化曲线

通过垫片法和蜡封法对试件进行端部处治,其实测动态模量分别比未处治的  $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  尺寸试件高约 10% 和 20%,比未处治的  $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  尺寸试件低约 20% 和 10%,说明端部处治效果显著降低了端部摩擦力的影响,且蜡封法的处治结果与

$\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  尺寸试件更接近,说明蜡封法的处治效果优于垫片法。

## 4 变形采集手段对动态模量取值的影响

变形的测试手段是影响动态模量试验结果准确度的重要因素。目前国内外常见的变形测试手段有:①仪器自带传感器,即配套于仪器的位移传感器;②顶面两端沿对角线设置的线性位移传感器(LVDT);③固定于试件侧面的 LVDT。同时采用上述 3 种变形采集方式测试标准尺寸试件的竖向回弹变形,并计算得到其动态模量值,结果如表 5 所示。

由表 5 可知:仪器自带传感器采集得到的变形数据偏大,按该数据计算得到的动态模量小于规范要求,

表5 不同变形采集方法结果对比

应力/ MPa	仪器自带传感器		顶面两端 LVDT		侧面 LVDT	
	变形/ mm	模量/ MPa	变形/ mm	模量/ MPa	变形/ mm	模量/ MPa
2.2	0.32	1 035	0.18	1 836	0.26	1 276
2.9	0.36	1 200	0.21	2 034	0.24	1 805
3.6	0.39	1 373	0.22	2 435	0.24	2 236
4.3	0.44	1 454	0.25	2 597	0.26	2 460
5.0	0.48	1 547	0.27	2 783	0.29	2 610

建议有条件时应采用外接的变形采集方式进行测量。顶面法与侧面法 LVDT 测得的竖向回弹变形接近,但顶面两端架设 LVDT 的方法只是削弱了端部效应的影响,而侧面法因针对试件侧面中部的竖向变形进行测试,受端部效应影响极小,测得的变形更为准确。

考虑到在 3.1 节的测试过程中,试件的竖向回弹变形是唯一存在的某个实数值,可以把表 5 中 3 组不同变形作为该实数值在不同测试手段下的映射结果,作出 3 种手段测得的变形散点图(图 5)。

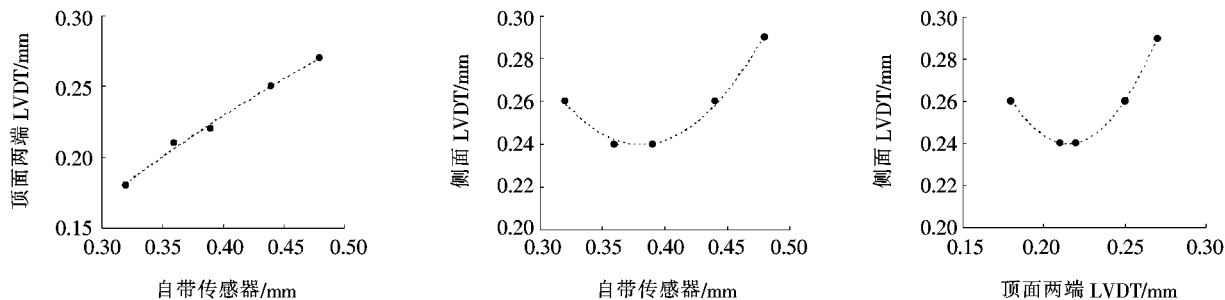


图5 不同变形采集手段的散点图

由图 5 可知:不同采集手段测得的变形之间存在二次曲线关系,假设其转化方程为:

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

则可以得到不同采集手段测量变形间的转换系数 A、B、C 见表 6。

表 6 不同采集手段的转换系数

自变量	因变量	A	B	C	R <sup>2</sup>
自带传感器变形	顶面两端 LVDT 变形	-0.64	1.03	-0.08	0.99
自带传感器变形	侧面 LVDT 变形	4.28	-3.25	0.86	0.99
顶面两端 LVDT 变形	侧面 LVDT 变形	14.78	-6.3	0.91	0.99

5 结论

根据试验数据及研究结果,推荐采用尺寸为  $\phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  试件进行测试,采用外接 LVDT 进行数据采集,并明确了其他影响因素对模量测试结果的误差范围,建立了不同尺寸、不同数据采集方法之间的换算公式,可得如下结论:

(1) Haversine 波和三角波下测得的动态模量基本相当,半正弦波形加载测得的动态模量是 Haversine 波和三角波的 1.2~1.5 倍,10 Hz 频率下连续加载是间歇加载测得的动态模量的 1.2 倍左右。

(2) 试件尺寸是影响动态模量取值的重要因素,测得的  $\phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$  试件动态模量为  $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  试件的 1.2~1.6 倍,可按下式对两种尺寸测得的动态模量值进行换算:

$$E_{150} = 1.17E_{100} + 259$$

(3) 垫片法和蜡封法对试件进行端部处治可有效削弱端部效应影响,其实测动态模量比未处治的  $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  尺寸试件分别高约 10% 和 20%。

参考文献:

[1] NCHRP. Guide for Mechanistic — Empirical Design of Pavement Structures, NCHRP Project 1 — 37A [R]. Washington, D. C.: National Cooperative Highway Research Program, 2004.

[2] Huang Y, Wang X, Liu Z, et al. Dynamic Modulus Test and Master Curve Analysis of Asphalt Mix with Trape-

zoid Beam Method[J]. Road Materials & Pavement Design, 2017, 18(5): 1—11.

[3] JTJ 014—1986 公路柔性路面设计规范[S].

[4] JTJ 014—1997 公路沥青路面设计规范[S].

[5] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S].

[6] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].

[7] JTG E20—2011 公路沥青及沥青混合料试验规程[S].

[8] 徐志荣,常艳婷,陈忠达,等. 沥青混合料动态模量试验标准研究[J]. 交通运输工程学报, 2015(3).

[9] 羊明. 沥青混合料动态模量研究[D]. 长沙理工大学硕士学位论文, 2007.

[10] 李德超. 沥青混合料动态模量试验研究[J]. 公路, 2008(1).

[11] 刘靖宇,王旭东,刘朝晖,等. 静、动抗压回弹模量的试验研究[J]. 公路交通科技, 2017(6).

[12] Dang J, Yuan H, Igarashi A. A Curve Approximated Hysteresis Model for Steel Bridge Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 5(9): 758—782.

[13] Meng L, Xue L, Fan G, et al. Time—Temperature—Ag-ing—Depth Shift Functions for Dynamic Modulus Master Curves of Asphalt Mixtures [J]. Construction & Building Materials, 2017, 157: 943—951.

[14] 赵延庆,薛成,黄荣华. 沥青混合料抗压回弹模量与动态模量比较分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007(12).

[15] 姚爱玲,张西玲,王选仓. 测试方法对沥青混合料抗压回弹模量的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005(6).

[16] 李浩天,王庆凯,马华宝. 河北省典型沥青混合料动态模量不同使用水平下的取值分析[J]. 中外公路, 2018(2).

[17] 黄筑江. 特立尼达湖沥青 (TLA) 改性沥青混合料的动态模量试验研究[J]. 中外公路, 2017(3).