

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.008

# 半柔性路面模量特性研究

蔡玉斌<sup>1</sup>, 龚明辉<sup>2,3</sup>, 熊子佳<sup>2,3</sup>, 邓成<sup>2,3</sup>, 彭刚<sup>2,3</sup>, 张立华<sup>2,3</sup>, 洪锦祥<sup>2,3</sup>

(1. 盐城市公路管理处, 江苏 盐城 224005; 2. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 江苏 南京 211103;

3. 江苏省建筑科学研究院有限公司 高性能土木工程材料国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

**摘要:**半柔性路面具有承载力好和抗剪切变形能力强的优点,是解决交叉口、公交站台等路段车辙病害的有效手段。然而由于力学性能的差异,半柔性路面无法完全参照水泥混凝土路面或者沥青混凝土路面设计方法,而建立适用于半柔性路面设计体系的重要工作之一就是分析路面材料模量特性。该文基于室内试验对室内成型试件及取芯试件,进行动态模量、间接拉伸劲度模量、回弹模量测试,并通过落锤式弯沉仪采集路面弯沉数据。试验结果表明:在中温度域范围内,半柔性路面材料与沥青混合料动态模量相近;而在高温低频条件下,两种材料动态模量差异显著。对比回弹模量和弯沉数据发现,半柔性路面模量约为沥青路面模量的两倍,而前者弯沉仅为后者的1/2。研究结果表明:试验方法和加载模式对两种材料模量的影响规律显著不同,路面设计应进一步结合两种路面典型破坏模式选取不同测试条件下的模量参数进行结构设计。

**关键词:**半柔性路面;模量;落锤式弯沉;荷载模式;温度

**中图分类号:**U416.221

**文献标志码:**A

## 0 引言

现阶段,各等级公路和市政道路主要采用沥青混凝土和水泥混凝土材料<sup>[1]</sup>,其中沥青路面由于具有施工周期短、养护维修方便以及行车舒适性好的特点而得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>。然而,随着中国交通量的急剧增加以及重载交通比例的大幅提高<sup>[5]</sup>,原有沥青路面结构和材料不足以抵抗行车荷载<sup>[6]</sup>,往往在服役初期就出现严重裂缝和车辙病害<sup>[7-8]</sup>。其中,在交叉口<sup>[9]</sup>、公交车专用车道<sup>[10]</sup>等渠化交通路段<sup>[11]</sup>,由车辆反复启停造成的沥青材料剪切变形破坏尤为突出<sup>[12-13]</sup>。

近年来,采用半柔性路面解决渠化交通车辙问题的方案逐渐受到重视<sup>[14-15]</sup>。这一技术最早起源于欧美发达国家<sup>[16]</sup>,主要应用于港口、机场、码头等重载路段<sup>[17]</sup>。由于采用柔性骨架和刚性填充,半柔性路面材料兼具沥青混凝土柔性和水泥混凝土刚性特征,应用前景广泛<sup>[18]</sup>。然而,目前灌入式水泥-沥青路面结构的厚度、层位设计主要参照经验,缺乏一定的科学性和经济性<sup>[19]</sup>。材料模量是结构设计最主要

参数之一,因此,建立半柔性路面设计方法首先需要研究复合材料的模量特性。

由此,本文采用室内成型及实地取芯试件进行半柔性路面材料模量特性研究,并对实际路面进行弯沉检测,以此为半柔性路面结构设计提供材料参数和设计依据。

## 1 材料

### 1.1 大孔隙沥青混合料

研究采用SBS改性沥青、玄武岩集料以及石灰岩矿粉进行大孔隙沥青混合料成型。不同材料性能指标如表1、2所示。

表1 沥青技术指标

技术指标	单位	测试结果	规范要求
针入度(25℃)	0.1 mm	71.0	60~80
软化点	℃	56.5	≥55
延度(5℃, 5 cm/min)	cm	34.0	≥30
黏度(135℃)	Pa·s	2.1	≤3

收稿日期:2022-07-14(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078241);江苏省自然科学基金资助项目(编号:SBK2021044905)

作者简介:蔡玉斌,男,高级工程师.E-mail:717148765@qq.com

大孔隙沥青混合料级配如表3所示,根据析漏试验和飞散试验,确定最佳油石比为3.2%,空隙率为25%。成型过程中,将集料和沥青分别加热至175℃和160℃,并在170℃条件下加热拌和,利用Superpave旋转压实仪成型试件。待试件冷却至室温后,用胶带裹覆大孔隙沥青混合料试件,留作灌浆备用。

表2 集料与矿粉技术指标

粒径/ mm	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	毛体积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/ %
9.5~13.2	2.956	2.863	0.38
4.75~9.5	2.947	2.829	0.47
2.36~4.75	2.844	2.769	0.72
0~2.36	2.848	—	—
矿粉	2.685	—	—

表3 大孔隙沥青混合料级配

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
9.5~13.2	88	0~2.36	9
4.75~9.5	0	矿粉	3
2.36~4.75	0		

1.2 灌浆材料

采用高速剪切机以5 000 r/min的转速将灌浆材料与水按照0.32的比例拌和即可制得灌浆料,灌浆料的性能指标如表4所示。

表4 灌浆料性能指标

流动度/s	抗压强度/MPa		
	3 h	12 h	28 d
14	4.9	17.8	25.4

1.3 取芯试样

从不同地区半柔性路面试验段中共计取芯16个用于性能检测。上述试验段采用相同的大孔隙沥青混合料设计空隙率以及相同的灌浆材料,集料和沥青均采用玄武岩和SBS改性沥青。根据不同路面结构和半柔性路面厚度,选取5个试件用于动态模量测试,具体尺寸如表5所示,其余试件切割后进行间接拉伸试验测试。

表5 半柔性路面取芯试样尺寸

试样编号	高度/mm	直径/mm
SFP-F-1	103.58	98.58
SFP-F-2	96.08	98.62
SFP-F-3	104.04	98.92
SFP-F-4	91.35	98.44
SFP-F-5	93.89	99.07

2 试验

2.1 动态模量试验

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)对室内成型试件以及取芯试件进行动态模量测试,测试频率为25 Hz、20 Hz、10 Hz、5 Hz、1 Hz、0.5 Hz以及0.1 Hz,测试温度范围为15~45℃。

2.2 间接拉伸试验

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)对室内成型试件以及取芯试件进行间接拉伸试验,加载速率为50 mm/min,测试温度为15℃。

2.3 回弹模量试验

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)对室内成型试件进行抗压回弹模量测试,测试温度为20℃。

2.4 FWD试验

采用落锤式弯沉仪采集沥青路面和半柔性路面弯沉数据,FWD测试参数如表6所示。

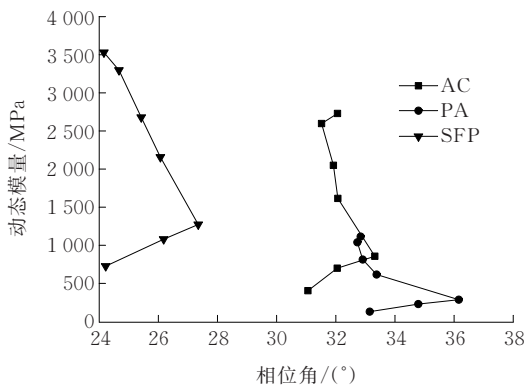
表6 FWD测试主要参数

加载板直 径/mm	传感器数 量/个	加载范围/ kN	测试精度/ μm	荷载脉冲 形状
300	9	12~150	0.1	半正弦波

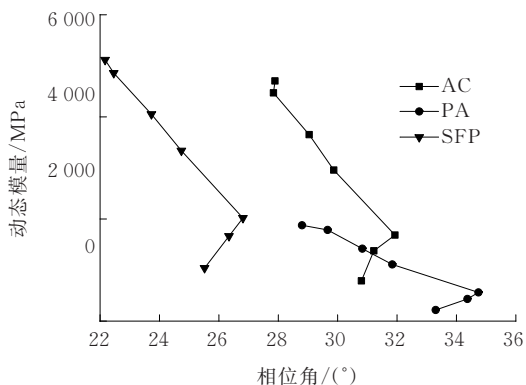
3 结果及讨论

3.1 动态模量试验

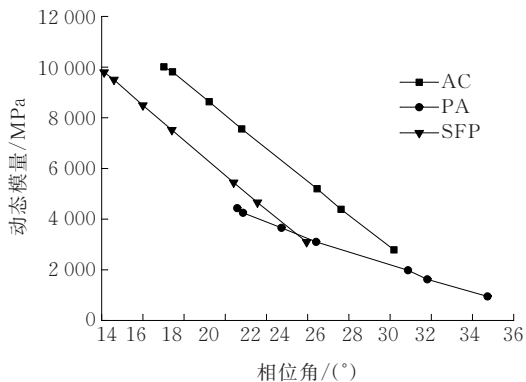
室内成型密级配沥青混合料(AC)、大孔隙沥青混合料(PA)以及半柔性路面试件(SFP)的动态模量数据如图1所示。每个样品测试数据由上至下分别为25 Hz、20 Hz、10 Hz、5 Hz、1 Hz、0.5 Hz、0.1 Hz。由图1(a)、(b)可以看出在45℃和35℃条件下所有混合料试件的动态模量曲线都存在“拐点”,且都对应于1 Hz加载频率数据。与密级配沥青混合料相比,大孔隙沥青混合料动态模量较低,相位角较大;半柔性路面动态模量较大,相位角较小。沥青混合料力学性能由沥青的胶结作用以及集料的骨架嵌挤作用构成。当加载频率小于1 Hz时,集料骨架作用对混合料整体动态模量起决定性作用。因此,通过



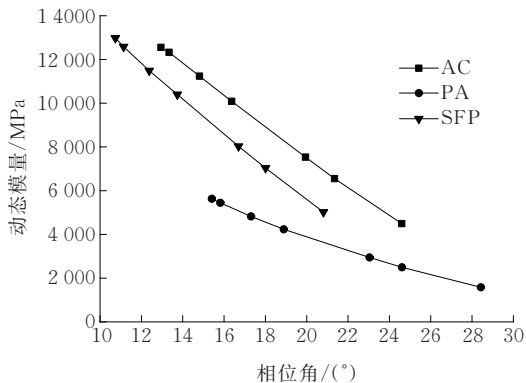
(a) 45 °C



(b) 35 °C



(c) 25 °C

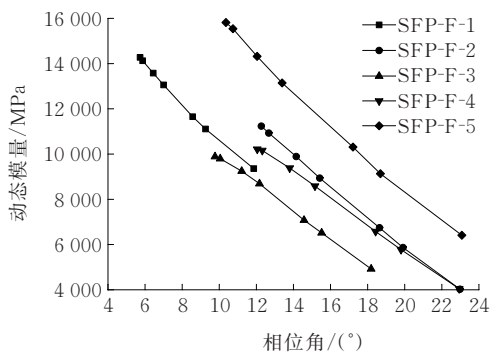


(d) 15 °C

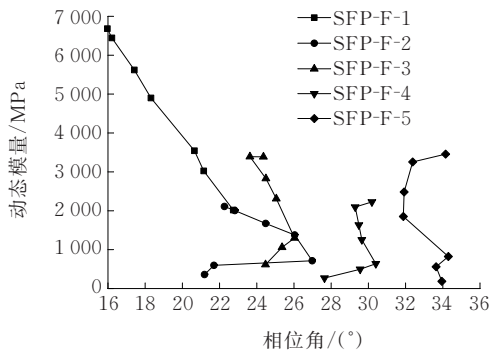
图 1 不同温度条件下试件动态模量

动态模量曲线可以认为半柔性路面材料是一种特殊的密级配沥青混合料。当试验温度降低时,所有试件动态模量曲线都未出现拐点。同时,当测试温度从 45 °C 降低至 15 °C 时,AC 试件与 SFP 试件的动态模量曲线逐渐趋近。尤其在 15 °C 时,两种材料的动态模量曲线几乎相似,说明 AC 与 SFP 在中温度范围内具有相似的力学性能。

对 5 组取芯半柔性试件进行动态模量对比结果如图 2 所示。可以发现:不同试件模量数据差异显著。说明虽然都采用玄武岩、SBS 改性沥青和同种灌浆材料,并按照相同的空隙率要求进行设计,但是由于同种玄武岩和沥青之间存在差异,设计出的不同半柔性路面试件力学性能也会存在较大差别。



(a) 15 °C



(b) 45 °C

图 2 15 °C 和 45 °C 条件下半柔性路面取芯试件  
动态模量-相位角曲线

由图 2 可知:45 °C 条件下 SFP-F-5 的动态模量-相位角曲线与图 1(a) 中 SFP 试件结果相似。SFP-F-2、SFP-F-3 以及 SFP-F-4 具有相近的相位角,但是动态模量更低,而 SFP-F-1 相位角远小于另 4 组试件。在 45 °C 条件下,除了 SFP-F-1 试件外,所有取芯试件动态模量-相位角曲线都出现“拐点”,而 SFP-F-1 试件的动态模量随着频率减小而逐渐降低。

出现这一现象的原因可能是施工变异性。因此在灌注后形成的三维网络结构具有更大的刚性,表现为模量更高,相位角更小。

3.2 间接拉伸试验

将动态模量测试后的取芯试件切割从而进行间接拉伸试验,试验结果如表7所示,其中垂直方向变形是指最大破坏荷载时的垂直方向总变形。通过对比沥青路面试件数据,可以发现半柔性路面试件的垂直方向变形略大,而间接拉伸强度值较高,其劲度模量约为AC-13试件的两倍。但是对比5组半柔性路面试件间接拉伸试验结果也可以发现不同试验段取芯试件性能差异较为显著,这说明不同地材对半柔性路面的力学性能有较大影响。如果沥青与水泥无法有效黏结,在拉力作用下界面容易失效,进而造成混合料损伤。对比不同试件破坏拉伸应变均值和AC-13沥青混合料数据,可以发现半柔性路面材料和沥青路面材料在极限破坏变形能力上具有相似性,体现出半柔性路面材料“刚柔并济”的特点。

表7 半柔性路面和沥青路面试件间接拉伸试验结果

编号	垂直方向 变形/mm	间接拉伸 强度/MPa	破坏拉伸 应变	破坏劲度 模量/MPa
SFP-F-1	3.04	2.157	0.010	403.0
SFP-F-2	1.72	1.788	0.006	589.3
SFP-F-3	1.84	2.119	0.006	653.4
SFP-F-4	2.41	1.580	0.008	371.6
SFP-F-5	1.97	2.441	0.007	701.3
均值	2.20	2.017	0.007	543.7
AC-13	1.95	0.823	0.006	251.2

3.3 抗压回弹模量试验

半柔性路面试件和沥青路面试件抗压回弹模量结果见表8。

表8 半柔性路面和沥青路面试件抗压回弹模量试验结果

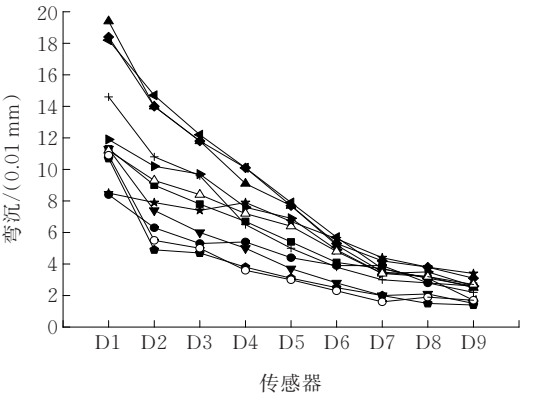
混合料类型	抗压强度/MPa	回弹模量/MPa
AC-13	5.82	1 356
SFP	7.89	2 518

由表8可以发现:半柔性路面试件的抗压强度高 于沥青混合料,而回弹模量约为沥青混合料的两倍。对比抗压回弹模量、间接拉伸结果以及动态模量试验结果,发现不同加载模式条件下,抗压回弹模量和间接拉伸破坏劲度模量数据相关性较好。半柔性路面试件的抗压回弹模量和间接拉伸破坏劲度模量均为沥青路面试件的两倍左右,而在15℃下两种路面

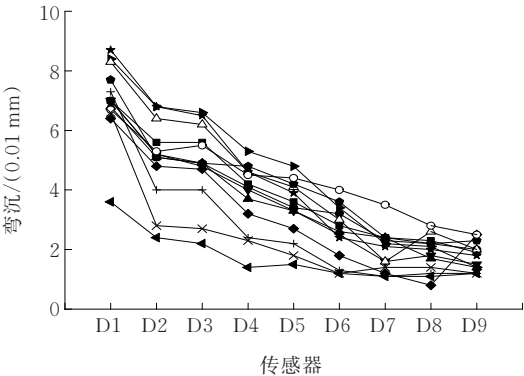
材料的动态模量相近,因此采用不同模量进行设计的路面结构路用性能将会产生较大差别。

3.4 路面弯沉

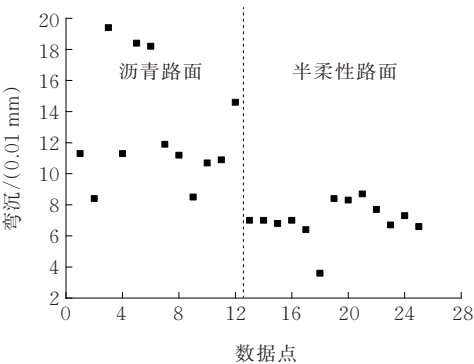
采用落锤式弯沉仪对半柔性路面和沥青路面弯沉数据进行采集,不同路面结构弯沉对比见图3。图3中一条曲线对应9个传感器随机一个测点的数据。



(a) 沥青路面



(b) 半柔性路面



(c) 不同路面结构弯沉数据对比

图3 沥青路面和半柔性路面弯沉数据

由图3可以看出:沥青路面弯沉值一般为8~20 (0.01 mm),而半柔性路面弯沉值仅为6~9 (0.1 mm),半柔性路面弯沉值显著小于沥青路面,说明半柔性路面承载力更好。对比弯沉结果和模量数据,路面弯沉与上面层材料抗压回弹模量相关性更优。但是弯沉结果不能反映路面结构其他路用性能,尤



其在交叉口路段,路面结构抵抗重载车辆频繁启停作用能力无法通过弯沉数据进行表征,因此建议针对道路交叉口,宜采用高温低频条件下的动态模量作为设计控制指标。

## 4 结 论

半柔性路面材料能够有效解决道路交叉口的车辙病害,但是现阶段关于半柔性路面的结构设计主要依据经验,缺乏经济性。本文采用多种手段针对半柔性路面材料的模量特性进行研究,得到以下结论:

(1) 在 35 °C 和 45 °C 条件下,半柔性路面和沥青路面材料的动态模量-相位角曲线均出现了拐点,而在 15 °C 和 25 °C 条件下,两种材料动态模量相近。

(2) 间接拉伸试验和抗压回弹模量数据表明半柔性路面试件强度高于沥青路面试件,前者模量约为后者的两倍。

(3) 不同地区取芯结果表明沥青混合料骨架对半柔性路面材料性能有显著影响,应重点研究沥青-集料界面以及水泥-沥青界面在受拉作用下的强度。

### 参考文献:

- [1] AL-QADI I L, GOURU H, WEYERS R E. Asphalt portland cement concrete composite: laboratory evaluation [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(1): 94-108.
- [2] 钟科,陈波,蒋恩贵,等.灌注式半柔性路面材料研究与应用综述[J].中外公路,2017,37(2):232-235.
- [3] CAI J, PEI J Z, LUO Q H, et al. Comprehensive service properties evaluation of composite grouting materials with high-performance cement paste for semi-flexible pavement [J]. Construction & Building Materials, 2017, 153:544-556.
- [4] PEI J Z, CAI J, ZOU D G, et al. Design and performance validation of high-performance cement paste as a grouting material for semi-flexible pavement[J]. Construction & Building Materials, 2016, 126:206-217.
- [5] AFONSO M L, DINIS-ALMEIDA M, PEREIRA-DE-OLIVEIRA L A, et al. Development of a semi-flexible heavy duty pavement surfacing incorporating recycled and waste aggregates-preliminary study[J]. Construction & Building Materials, 2016, 102:155-161.
- [6] 成志强,孔繁盛,贾蓉蓉.半柔性路面水泥基灌浆材料泌水性能研究[J].中外公路,2016,36(4):276-279.
- [7] DU Y F, CHEN J Q, HAN Z, et al. A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods[J]. Construction & Building Materials, 2018, 168:893-905.
- [8] 邓成,黄冲,洪锦祥,等.超早强半柔性路面在市政路口的应用研究[J].公路工程,2016,41(1):116-119.
- [9] GONG M H, XIONG Z J, CHEN H, et al. Evaluation of the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation[J]. Construction & Building Materials, 2019, 168:893-905.
- [10] HONG J X, WANG K J, XIONG Z J, et al. Investigation into the freeze-thaw durability of semi-flexible pavement mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 21(8):2198-2214.
- [11] HUSAIN N M, KARIM M R, MAHMUD H B, et al. Effects of aggregate gradation on the physical properties of semiflexible pavement[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2014, 2014(1):1-8.
- [12] DING Q J, SUN Z, SHEN F, et al. The performance analysis of semi-flexible pavement by the volume parameter of matrix asphalt mixture[J]. Advanced Materials Research, 2010, 168-170:351-356.
- [13] SETYAWAN A. Assessing the compressive strength properties of semi-flexible pavements[J]. Procedia Engineering, 2013, 54:863-874.
- [14] SUHANA Koting, REHAN Karim Mohamed, HILMI Mahmud. The properties of bituminous mixtures for semi-flexible pavement[J]. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2007, 2007:281.
- [15] KOTING S, REHAN M, MAHMUD H, et al. Effects of using silica fume and polycarboxylate-type superplasticizer on physical properties of cementitious grout mixtures for semiflexible pavement surfacing[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014:596364.
- [16] HOU S G, XU T, HUANG K. Investigation into engineering properties and strength mechanism of grouted macadam composite materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(10):878-886.
- [17] ZHANG J P, CAI J, PEI J Z, et al. Formulation and performance comparison of grouting materials for semi-flexible pavement[J]. Construction & Building Materials, 2016, 115:582-592.
- [18] WANG D Y, LIANG X Y, JIANG C F, et al. Impact analysis of carboxyl latex on the performance of semi-flexible pavement using warm-mix technology[J]. Construction & Building Materials, 2018, 179: 566-575.
- [19] PRATELLI C, BETTI G, GIUFFRÈ T, et al. Preliminary in-situ evaluation of an innovative, semi-flexible pavement wearing course mixture using fast falling weight deflectometer[J]. Materials, 2018, 11(4):611.