

文章编号:1671-6833(2008)01-0128-04

## 高模量沥青混凝土力学性能试验研究

周庆华<sup>1,2</sup>, 沙爱民<sup>1</sup>, 杨 琴<sup>1</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. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710021)

**摘 要:** 针对添加专用外掺剂 PR Module 的高模量沥青混凝土(HMAC)的力学性能展开室内和现场测试研究。试验结果显示, 外掺剂使得沥青混凝土材料的回弹模量值提高45%, 动态模量提高了77%以上, 而现场落锤式弯沉仪(FWD)的测试结果显示, 高模量沥青混凝土路面的综合模量高于 SBS 改性沥青路面的综合模量, 该外掺剂是改善路面结构整体承载能力的良好选择。

**关键词:** 高模量沥青混凝土; 高模量添加剂; 外掺剂; 力学性能

**中图分类号:** U 416.217

**文献标识码:** A

### 0 引言

伴随着公路运输交通量急剧增加, 超载、重载现象日益严重, 路面结构的损坏也逐渐加剧, 许多沥青路面在通车不久就发生不同类型的损坏, 严重影响了道路的服务质量<sup>[1]</sup>。为了解决道路早期破坏的问题, 许多新型道路材料开始用于高等级公路上。

高模量沥青混凝土(HMAC)在法国使用已经超过20年的时间<sup>[2]</sup>, 其原理是通过提高沥青混凝土的模量, 减少车辆荷载作用下沥青混凝土产生的变形, 提高路面抗高温变形能力, 改善路面的疲劳性能, 延长路面的使用寿命, 包括法国在内的许多欧洲国家都先后对其展开的研究。由于各国的材料组成和设计方法均不相同, 高模量沥青混凝土也呈现出不同的性能表现。究竟何种途径可以更好地实现模量提高, 各个国家均有不同的经验。在我国, 针对高模量沥青混凝土的研究才刚刚起步, 对高模量沥青混凝土的材料组成以及实际路用性能还不了解, 需要在国外研究成果的基础上, 研究高模量沥青混凝土材料组成, 总结高模量沥青混凝土的力学特征, 为高模量沥青混凝土在我国的推广应用积累经验。

通过前期大量调研, 笔者选用了添加 PR Module 外掺剂来制备高模量沥青混凝土, 通过一

系列的模量测试评价混合料的力学性能, 并结合实体工程的现场测试结果, 分析外掺剂对沥青混凝土力学性能的影响水平和规律。

### 1 材料组成

#### 1.1 原材料

本研究中沥青材料选用韩国 SK-70 沥青, 集料采用河南荥阳产优质石灰岩。经测试, 沥青和集料的各项指标均满足规范要求。同时采用法国高模量添加剂(PR Module, 如图1所示), 进行高模量沥青混凝土相关试验研究。

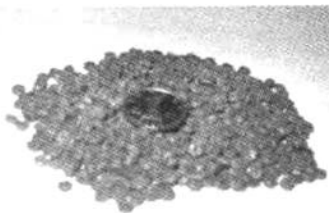


图1 PR module 外掺剂

Fig.1 PR module additives

#### 1.2 混合料级配

试验共选用了4种级配, 其中中粒式混合料2种: 代表我国规范中值级配的 AC20 和典型的 Superpave 级配 Sup20; 粗粒式混合料2种: AC25 和 Sup25, 并通过马歇尔方法确定相应油石比, 见

收稿日期:2007-09-27; 修订日期:2007-11-28

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0834)。

作者简介:周庆华(1977-), 女, 河南新乡人, 长安大学博士研究生, 讲师, 主要从事路面材料和结构研究, E-mail: zqhlsg@126.com

表 1. 外掺剂的用量采用推荐的 0.7%.

表 1 沥青混合料的级配数据

Tab.1 Gradation of asphalt mixture

%

级配 类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分数													油石 比
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
AC20	100	100	95	85	71	61	41	30	22.5	16	11	8.5	5	4.3
Sup20	100	100	95	86	75	64	45	31	21	14.5	10.5	7.5	5	4.38
AC25	100	97.5	82.5	74	66.5	55	38	29	22.5	16	11	8.5	5	4.2
Sup25	100	95	78.4	71	64.4	57.2	37.3	23.9	16.9	12.5	8.6	6.6	4.9	4.1

## 2 室内力学性能测试

作为高模量的沥青混凝土,材料的力学性能是至关重要的.按照法国 NFP-140 标准中的定义<sup>[3]</sup>,只有动态模量  $E^*$  (15℃, 10 Hz) 达到  $\geq 14\ 000$  MPa 的要求沥青混凝土才可以被称为“高模量沥青混凝土”,因此本研究重点放在材料的力学性能上.目前我国常用的反映沥青混合料模量的指标有回弹模量、动态复数模量等<sup>[3]</sup>.由于高模量沥青混凝土具有典型的黏弹特性,因此分析高模量沥青混凝土的力学性能,需要采用特定的试验方法,在特定条件下测试相关力学指标.

### 2.1 回弹模量

路面材料的抗压回弹模量反映了材料抵抗可回复变形的能力,作为对比,同时开展了普通沥青混凝土和添加 PR Module 的高模量沥青混凝土 20℃ 抗压回弹模量的测试,表 2.

表 2 20℃ 回弹模量测试结果

Tab.2 20℃ Modulus of resilience testing results

级配 类型	添加剂 用量/%	抗压强 度/MPa	回弹模 量/MPa	抗压强度 增长率/%	回弹模量 增长率/%
AC20	0	3.23	1 295	0.00	0.0
	0.7	3.84	1 780	18.89	37.5
Sup20	0	2.36	1 196	0.00	0.0
	0.7	3.71	1 713	57.20	43.2
AC25	0	2.88	1 180	0.00	0.0
	0.7	3.99	1 694	38.54	43.6
Sup25	0	2.55	1 072	0.00	0.0
	0.7	3.86	1 640	51.37	53.0

试验结果显示,对 4 种不同级配沥青混合料而言,外掺剂的应用使得混合料的抗压回弹模量平均提高约 45%.增幅最大的是 Sup25 型混合料,其增幅高达 53%.这说明 PR Module 外掺剂对 HMAC 的抗压回弹模量有显著影响.对同一添加剂掺量而言,级配对 HMAC 的抗压回弹模量也有影响,Superpave 级配的增幅大于 AC 级配.相比而言,外掺剂对 Superpave 级配的混合料的影响

更为显著.

### 2.2 动态复数模量

车辆荷载对沥青路面的冲击属于动态作用,沥青混合料在动态荷载作用下的力学反应更接近于实际状况.为了便于操作,本研究采用美国 MTS-810 材料试验机,采用单轴动态压缩试验方法进行 HMAC 动态模量的测试.

对 4 种级配的高模量沥青混凝土和同级配的普通沥青混凝土进行测试对比.试验温度为 15℃,试件为静压成型的  $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  的圆柱体试件,采用频率扫描的方式,频率范围为 0.1~10 Hz,分别在 5 种频率下进行动态模量和相位角的测试,结果见表 3.

表 3 15℃ 动态模量测试结果

Tab.3 Dynamic modulus testing results

级配 类型	试验 频率 /Hz	外掺剂用量 0.7%		不用外掺剂	
		动态模量 /MPa	相位角 $\delta/(^{\circ})$	动态模量 /MPa	相位角 $\delta/(^{\circ})$
AC20	10.0	10 789.310	19.3	5 150.287	19.8
	3.0	7 105.074	21.1	4 232.320	21.3
	1.0	5 252.245	23.3	3 164.260	22.6
	0.3	3 226.532	41.2	2 009.798	39.7
	0.1	1 994.215	48.5	1 338.843	45.8
Sup20	10.0	9 561.46	17.7	5 071.403	20.9
	3.0	7 267.059	21.1	4 001.736	21.4
	1.0	5 486.787	22.3	3 041.457	23.1
	0.3	3 422.284	40.7	1 850.782	43.1
	0.1	2 124.009	49.0	1 173.055	50.5
AC25	10.0	9 455.412	19.3	5 344.368	18.8
	3.0	7 104.482	21.1	4 290.056	21.2
	1.0	5 252.285	23.3	3 235.744	23.3
	0.3	3 226.526	41.2	2 181.432	40.6
	0.1	1 994.227	48.5	1 127.120	49.5
Sup25	10.0	9 597.600	18.7	4 863.345	19.5
	3.0	7 354.145	21.1	4 075.850	21.3
	1.0	5 479.464	23.2	3 045.465	23.6
	0.3	3 155.452	40.5	1 983.252	41.4
	0.1	1 935.617	49.4	1 135.400	48.7

图 2 和图 3 中的试验结果表明,随着频率的增加,4 种 HMAC 沥青混合料的模量随之提高,相

位角随之降低. 动态模量整体上随加载频率呈半对数直线关系,说明当行车荷载速度提高时,沥青混合料的行为接近于弹性,模量较高,相位角较低,当频率降低,即行车速度较慢时,沥青混合料的模量较低,相位角随之增大,沥青混合料的行为接近于黏性,不利于路面变形的恢复. 在重载车辆多、坡度大的路段,车辆的行驶速度会比较低,这样的条件下应用高模量沥青混凝土更利于抵抗荷载作用.

在频率从高到低的变化过程中,掺入 0.7% 外掺剂的 HMAC 混合料动态模量比未掺入的动态模量均有大幅度提高,最大提高幅度可达到 1 倍以上,说明在车速变化范围内,该外掺剂对提高沥青混合料动态模量具有显著的效果. 因此可以采用此外掺剂来提高沥青路面的整体承载性能.

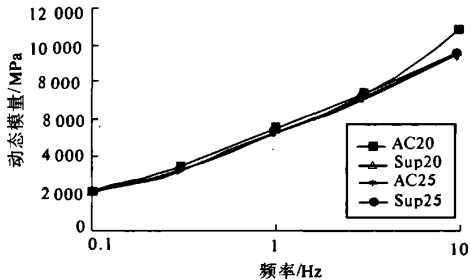


图 2 掺外掺剂的沥青混合料动态模量  
Fig. 2 Dynamic modulus with additives

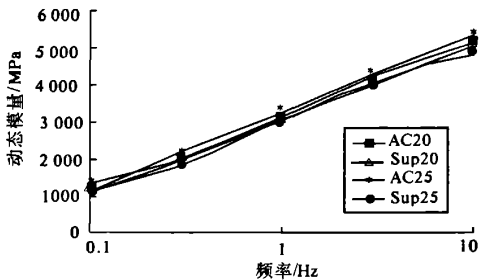


图 3 未掺外掺剂的沥青混合料动态模量  
Fig. 3 Dynamic modulus without additives

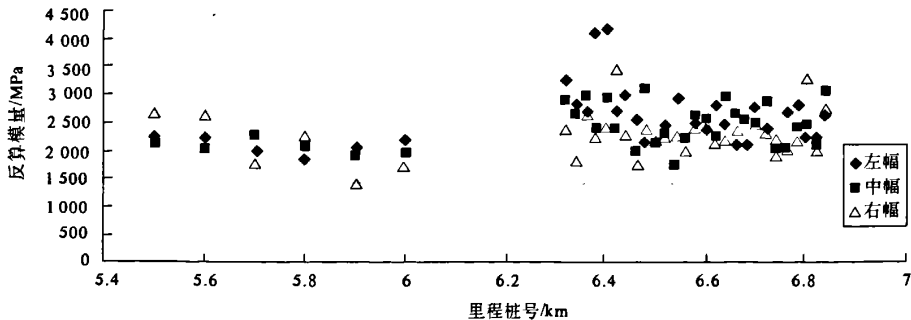


图 5 落锤式弯沉仪(FWD)测试结果  
Fig. 5 Falling weight deflectometer testing data

### 3 现场落锤式弯沉仪 FWD 测试

本研究于 2006 年 9 月在河南省扶项高速公路铺筑了 500 m 的 HMAC 试验段,并选取了相邻的 500 m 作为对比段,见图 4. 作为对试验路整体力学性能的评价,于 2007 年 5 月对试验段和对比路段进行现场弯沉和动态综合模量测试.

#### 3.1 测试设备

选用丹麦生产的拖挂式 DYNATEST 8000 型落锤式弯沉仪. 利用 50kN 重锤从一定高度自由落下,模拟标准测试车后轴单侧动荷载,通过承载板给路面一半正弦脉冲力,使路面产生变形;通过传感器自动采集,即可自动显示弯沉盆及弯沉最大值等参数,通过专业软件反算出沥青面层的综合动态模量,从而评价路面承载能力<sup>[5-7]</sup>.

SBS 改性 AC-13	SBS 改性 AC-13
高模量沥青混凝土 HMAC20	SBS 改性 SMA
AC-25	AC-25
水泥稳定碎石基层	水泥稳定碎石基层
水泥稳定碎石底基层	水泥稳定碎石底基层
土基	土基

(a) HMAC 试验段

(b) 对比段

图 4 扶项高速公路路面结构

Fig. 4 Pavement structure of fuxiang highway

#### 3.2 测试结果

分别对试验段和对比段的左、中、右 3 幅进行检测,试验段检测频率为 1 测点/20 m,对比段检测频率为 1 测点/50 m. 在同一测点重复测试 3 次,由于承载板、位移传感器与路表面的接触不密封和不稳定,经前 2 次锤击,保证测梁及其他构件处于正常测试状态,第 3 次可视为无形中的“3 次平均值”,取用第 3 次测值作为该测点实测结果,见图 5. 将左、中、右 3 幅测试结果的代值分别计算出来,对测试结果进行温度修正后列入表 4 中. 根据文献[8],温度修正系数  $K$  按式(1)计算.

$$K = 10^{0.01693(T - T_0)} \quad (1)$$

表4 FWD测试的沥青路面综合模量代表值

Tab.4 Comprehensive modulus of asphalt pavement

试 验 段	路面温度 /℃	车道	模量 /MPa	20℃模量 修正值/MPa
	29	左	2 313	3 285
	25	中	2 699	3 280
	24	右	2 813	3 288
对	25	左	2 077	2 524
比	25	中	2 037	2 475
段	24	右	2 683	3 136

结果表明,用落锤式弯沉仪(FWD)检测试验段3个车道的反算模量比正常路段的要高。虽然反算出来的模量属于沥青面层的综合模量,但由于路基情况基本类似,路面其它结构层相同,综合模量的差异也能反映 HMAC 中面层和 SBS 改性沥青中面层力学性能的差异。高模量沥青混凝土路段比 SBS 改性沥青混凝土路段的整体承载力好。

#### 4 结论

(1)外掺剂的使用可以显著提高沥青混凝土材料的回弹模量,提高程度平均可达到45%左右。

(2)在频率从高到低的变化过程中,掺外掺剂的 HMAC 混合料动态模量比普通沥青混凝土的动态模量有大幅度提高,可达到77%以上,在车速变化范围内,该外掺剂对提高沥青混合料动态模量具有显著的效果。

(3)高模量沥青混凝土试验段反算的综合模

量高于 SBS 改性沥青混凝土对比段的模量, HMAC 路面的承载能力比 SBS 改性沥青混凝土路面要好。

(4)外掺剂的使用能够改善路面结构的整体承载能力。使用该种外掺剂配制的 HMAC 在交通量大,超载、重载比例较高,车速缓慢的路段将能够体现出较好的承载性能。

#### 参考文献:

- [1] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [2] Jean - Francois Corté. Development and uses of hard - grade asphalt and of high - modulus asphalt mixes in france[C]. Washington D C: Transportation Research Board, 2001:12 - 31.
- [3] 陈佩茹. 与性能相关的法国沥青混合料设计方法[J]. 中外公路,2002,22,(2):56 - 59.
- [4] 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.
- [5] 杨屹东. 沥青路面结构动态模量试验研究[J]. 公路,2002,43,(2):26 - 28.
- [6] 刘建华,乐金朝,王复明,等. 落锤式弯沉仪在道路施工质量控制中的应用[J]. 郑州大学学报:工学版,2002,14(2):12 - 15.
- [7] 姬亦工,王复明,郭忠印. 基于落锤式弯沉仪(FWD)动态数据的路面模量反演方法[J]. 土木工程学报,2002,24(3):34 - 37.
- [8] 查旭东. 沥青路面反算模量的温度修正[J]. 公路,2002,43(6):51 - 53.

### Experimental Study for Mechanical Property of High Modulus Asphalt Concrete

ZHOU Qing - hua<sup>1,2</sup>, SHA Ai - min<sup>1</sup>, YANG Qin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
2. Department of Highway, Shaan'xi College of Communication Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The mechanical property of high modulus asphalt concrete(HMAC) is evaluated, which is prepared through adding PR Module additive to asphalt mixture. The results show that the resilient modulus of the high modulus asphalt mix is 45 percents higher than that of the conventional asphalt mix, the dynamic modulus of the HMAC is nearly twice of the conventional one. The Falling Weight Deflectometer (FWD) results show that the back - calculated modulus of HMAC trial pavement is higher than that of SBS modified asphalt pavement. The additive can improve the mechanical property of the asphalt pavement significantly.

**Key words:** high modulus asphalt concrete; PR Module; additive; mechanical property