

# 间断级配橡胶沥青混合料抗车辙性能

关永胜<sup>1,2</sup>, 谈至明<sup>1</sup>, 张志祥<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 江苏省交通科学研究所股份有限公司 新型道路材料国家工程实验室, 江苏 南京 211112)

**摘要:** 采用我国现行车辙试验、重复加载蠕变试验、动态模量试验等室内试验和工程验证, 通过对比间断级配橡胶沥青混合料 ARAC13 与苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物改性沥青(SBS 改性沥青)混合料 SMA13 的性能指标, 研究 ARAC13 的抗车辙性能。室内试验结果表明, 在初期压密阶段, ARAC13 压缩变形大、模量低; 初期压密以后, ARAC13 模量增大, 抗车辙能力增强。我国现行车辙试验不能模拟围压作用下沥青混合料的压密过程, 不能反映 ARAC13 混合料抗车辙性能在压密前后的变化; 重复加载蠕变试验可以反映其性能变化。4 年的工程应用表明, 重复加载蠕变试验 2 000 次后的应变-次数曲线斜率可以用于评价 ARAC13 的抗车辙性能, ARAC13 的抗车辙性能优于对比的 SMA13。

**关键词:** 橡胶沥青; 重复加载蠕变试验; 车辙试验; 动态模量

**中图分类号:** U416.218

**文献标志码:** A

## Rutting Performance of Gap Graded Asphalt Rubber Mixtures

GUAN Yongsheng<sup>1,2</sup>, TAN Zhiming<sup>1</sup>, ZHANG Zhixiang<sup>2</sup>

(1. Key laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. National Engineering Laboratory for Advanced Road Materials, Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 211112, China)

**Abstract:** A series of tests such as rutting test, repeated load test, dynamic modulus test and field test, were made to investigate the rutting performance of gap graded asphalt rubber mixtures ARAC13 in comparison with the modified asphalt mixture SMA13. The laboratory test results show that ARAC13 has bigger consolidated strain and smaller dynamic modulus on the consolidation stage of rutting process, subsequently, the rutting resistance and dynamic modulus of ARAC13 increase. At present, rutting tests in China cannot realize the simulation of the compaction process of asphalt

mixture under confining stress, therefore, the change of the rutting performance of ARAC13 cannot be obtained unless the repeated load test is made. A four-year-project application results show that the slope of the repeated load test for 2000 cycles can be used to evaluate the rutting performance of ARAC13, and the rutting performance of ARAC13 is superior to that of the control mixture SMA13.

**Key words:** asphalt rubber; repeated load test; rutting test; dynamic modulus

至 2009 年间断级配橡胶沥青混合料在美国亚利桑那州的使用已经超过了 25 年<sup>[1]</sup>, 湿法间断级配橡胶沥青混合料 ARAC13 在美国各州公路部门应用最为广泛, 且性能优于密级配类型<sup>[2]</sup>。在我国江苏省, 为了提高路面性能, 自 2004 年开始引进间断级配橡胶沥青混合料, 已进行了 8 年的研究和实践<sup>[3]</sup>。国内外的研究人员对间断级配橡胶沥青混合料高温稳定性、疲劳性能、低温性能进行了大量的研究<sup>[4-5]</sup>。采用中国规范的方法进行 ARAC13 的性能试验, 结果表明与使用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物改性沥青(SBS 改性沥青)的 SMA13 相比, ARAC13 的低温、水稳定性和疲劳性能与之相当, 但是反映抗车辙性能的动稳定度指标较差<sup>[3-5]</sup>, 与 ARAC13 的实际抗车辙性能不符。除我国现行的车辙试验外, 实验室评价沥青混合料抗车辙性能方法多种多样, 如法国的轮胎式车辙试验、恒高度重复剪切试验<sup>[6]</sup>、汉堡车辙方法<sup>[7]</sup>、重复加载蠕变试验等。其中, 重复加载蠕变试验通过简单性能试验机进行测试可以模拟车轮驶过时的围压状况和间歇时间。本文针对江苏省典型的间断级配橡胶沥青混合料 ARAC13 选择重复加载蠕变试验进行抗车辙性能评价, 采用动态模量试验进行验证, 并与 SBS 改性沥青 SMA13 的

收稿日期: 2012-05-05

基金项目: 科学技术部国际科技合作与交流专项项目(2010DFB83850)

第一作者: 关永胜(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为新型道路材料。E-mail: gys@jsti.com

通讯作者: 谈至明(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为路面工程。E-mail: tanjk@online.sh.cn

试验数据进行对比,最后通过工程应用效果对车辙试验方法和间断级配橡胶沥青混合料 ARAC13 的抗车辙性能进行评估。

## 1 ARAC13 混合料设计

橡胶沥青采用湿法加工工艺,使用 PG62-22 的

基质沥青和 20 目的橡胶粉,橡胶粉与基质沥青质量比为 18:82,橡胶沥青的性能指标见表 1。与美国亚利桑那州的 ARAC 混合料和德克萨斯州的 SMAR 混合料相比,江苏省采用的 ARAC13 混合料使用了较多的粗集料<sup>[3]</sup>。集料选用玄武岩,级配见表 2。

表 1 橡胶沥青性能指标

Tab.1 Properties of the asphalt rubber

项目	针入度(25℃,100 g,5 s) /0.1 mm	软化点/℃	177℃粘度/(Pa·s)	弹性恢复率/%
检测结果	43	64	2.85	88
设计要求	≥25	≥54.0	1.5~4.0	≥60.0
试验方法	规范 T0604—2000	规范 T0606—2000	规范 T0625—2000	规范 T0662—2000

表 2 ARAC13 级配

Tab.2 Gradation of ARAC 13

方孔筛 直径/mm	通过方孔筛的质量 分数/%	方孔筛 直径/mm	通过方孔筛的质量 分数/%
16.0	100.0	4.75	21.9
13.2	92.2	2.36	12.4
9.5	58.7	0.075	1.7

为了改善 ARAC13 的抗水损害性能,提高模量,在 ARAC13 中掺入质量分数为 2% 的水泥。采用马歇尔方法确定沥青质量分数,ARAC13 的设计结果见表 3。

表 3 马歇尔试验结果

Tab.3 Marshall test results

项目	沥青质量 分数/%	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)	空隙率/ %	矿料间隙率/ %	饱和度/ %
设计结果	7.75	8.45	22.6	5.62	21.93	74.35
技术要求		≥6.0	20~50	5.5±1.0	≥19	70~85

## 2 ARAC13 的基本路用性能

基本路用性能试验测试包括水稳定性能、低温性能和抗车辙性能。采用浸水马歇尔和冻融劈裂试验评价混合料的水稳定性,采用低温小梁弯曲试验

评价混合料的低温性能,采用我国现行车辙试验方法评价其抗车辙性能。为了更好地评价 ARAC13 的路用性能,采用 SMA13 作为对比混合料进行路用性能的测试,其中 SBS 改性沥青的性能分级为 PG70-22,试验结果见表 4。

表 4 ARAC13 基本性能

Tab.4 Basic performance of ARAC13

项目	浸水马歇尔试验残留稳定度/%	冻融劈裂试验劈裂强度比/%	低温弯曲破坏应变/ $10^{-6}$	车辙试验动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
ARAC13	89.8	88.0	2 950.7	3 672
SMA13	95.9	84.3	2 942.8	5 568
设计要求	≥85	≥80	≥2 500	≥3 000
试验方法	规范 T0709—2000	规范 T0729—2000	规范 T0728—2000	规范 T0719—2000

试验结果表明,与 SMA13 相比,ARAC13 具有相当的抗水损害性能和低温性能,但 ARAC13 的动稳定度指标相对较差。图 1 为 ARAC13 和 SMA13 我国现行车辙试验曲线。

从图 1 看出,ARAC13 和 SMA13 的车辙深度都随时间的增加而增加,但是增加的幅度都在减少。

ARAC13 是一种含有橡胶粉的高油石比、高孔隙率混合料;在围压的作用下,可能存在显著的初期压密过程。我国现行车辙试验中试验轮的尺寸较小,不能反映围压作用下的初期压密过程。因此,我国现行车辙试验的动稳定度指标能否反映 ARAC13 的抗车辙性能需要其他试验方法和实际路用性能的检验。

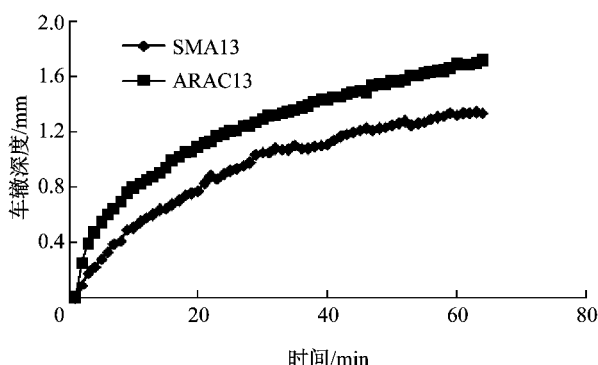


图1 我国现行车辙试验车辙深度与时间关系

Fig.1 Rutting depth of Chinese rutting test

### 3 ARAC13 重复加载蠕变试验

重复加载蠕变试验也称为重复加载蠕变永久变形试验,由美国公路合作研究项目开发,用于评价沥青混合料的抗车辙性能.重复加载蠕变试验可以采用第2区段的曲线斜率和截距以及流动数(flow number)3个指标评价沥青混合料的抗车辙性能.由于ARAC13是由集料、橡胶沥青和矿粉组成的非均质混合物,其重复加载蠕变试验的流动数比曲线斜率、截距具有更大的变异性,因此不采用流动数评价其高温性能.压密变形仅占车辙变形的小部分,体积不变的剪切变形是车辙形成的主要机理<sup>[8]</sup>,而截距主要是反映压密变形,第2区段的曲线斜率反映体积不变的剪切变形,所以采用第2区段的曲线斜率评价沥青混合料的抗车辙性能更合理.重复加载蠕变试验的参数如下:温度为55℃,轴向应力为0.7 MPa,接触应力为0.04 MPa,围压为0.14 MPa,加载时间为0.1 s,间歇时间为0.9 s,加载周期为10 000,试件空隙率为设计空隙率,试件个数为2个.其中,围压是影响混合料抗车辙性能评价的重要参数.在零围压条件下对SMA13混合料进行了测试,试验结果如图2所示.

从图2可知,在零围压条件下SMA13混合料永久变形迅速累积并破坏,而且2条试验曲线具有明显的变异性.说明围压对间断级配混合料SMA的高温性能具有重要的影响.由于ARAC13和SMA13都是间断级配混合料,本文采用有围压的重复加载蠕变试验进行ARAC13和SMA13的抗车辙性能评价.对2个平行试件蠕变曲线平均,然后进行数据分析,ARAC13和SMA13混合料重复加载蠕变试验曲线如图3所示,图中R为相关系数.

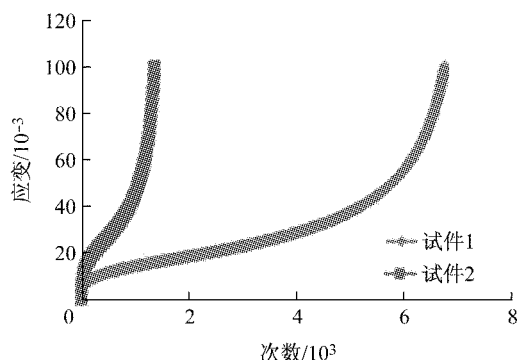


图2 零围压条件下SMA蠕变曲线

Fig.2 SMA creep curves under zero confining stress

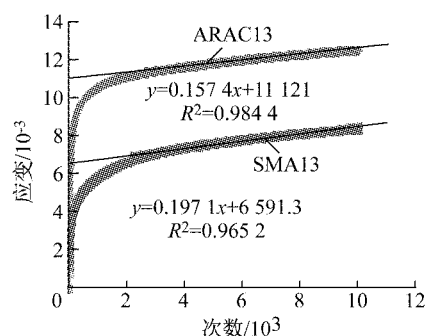


图3 重复加载蠕变曲线

Fig.3 Repeated load test results

从图3可知,2种沥青混合料的不可恢复变形在初期增长迅速,经过2 000次循环后增长缓慢,即重复加载蠕变试验曲线2 000次前与2 000次后具有较为明显的差异,即压密过程和体积不改变的剪切变形过程具有明显的差异.而在图1中,车辙曲线比较平缓,不能充分反映ARAC13的初期压密过程.而ARAC13具有较明显的初期压密过程,我国现行车辙试验对ARAC13的适用性有待考证.

从图3也可以看出,在重复蠕变2 000次后ARAC13和SMA13的蠕变曲线都呈线性、稳定增长.因此,采用重复蠕变2 000次后的应变-次数曲线斜率分析2种沥青混合料的高温性能是合理可行的.为了表述重复加载蠕变试验应变-次数曲线斜率,将图3的曲线进行简化,如图4所示.

由图4可知,与SMA13相比,ARAC13的不可恢复变形在第1阶段增长更加迅速,在2 000次循环后增长更为缓慢. ARAC13在重复加载蠕变试验的第1阶段具有较大的压缩变形,该现象是由于两方面的原因造成的,一是ARAC13的设计孔隙率是 $(5.5 \pm 1.0)\%$ ,SMA的设计孔隙率是 $3.0\% \sim 4.5\%$ ,ARAC13孔隙率较大则可压缩变形较大,二是ARAC13混合料的沥青质量分数高,并且橡胶粉

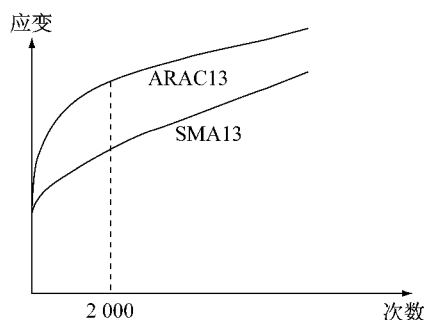


图 4 ARAC13 和 SMA13 重复加载蠕变试验模型

Fig. 4 Repeated load test model of ARAC13 and SMA13

颗粒具有一定的可压缩性. 重复加载蠕变 2 000 次时 ARAC13 的曲线斜率是 0.157 4, SMA13 的曲线斜

率是 0.197 1. 使用曲线斜率评价抗车辙性能, ARAC13 的抗车辙性能比 SMA13 高, 说明在完成初期压密后 ARAC13 具有良好的抗车辙性能.

由于 ARAC13 在车辙发展的第 1 阶段和第 2 阶段表现出截然不同的特性, 因此可以推断其力学性能在这 2 个阶段有明显的差异.

## 4 ARAC13 的动态模量

图 5 为 ARAC13 和 SMA13 重复加载蠕变试验前后的动态模量试验结果.

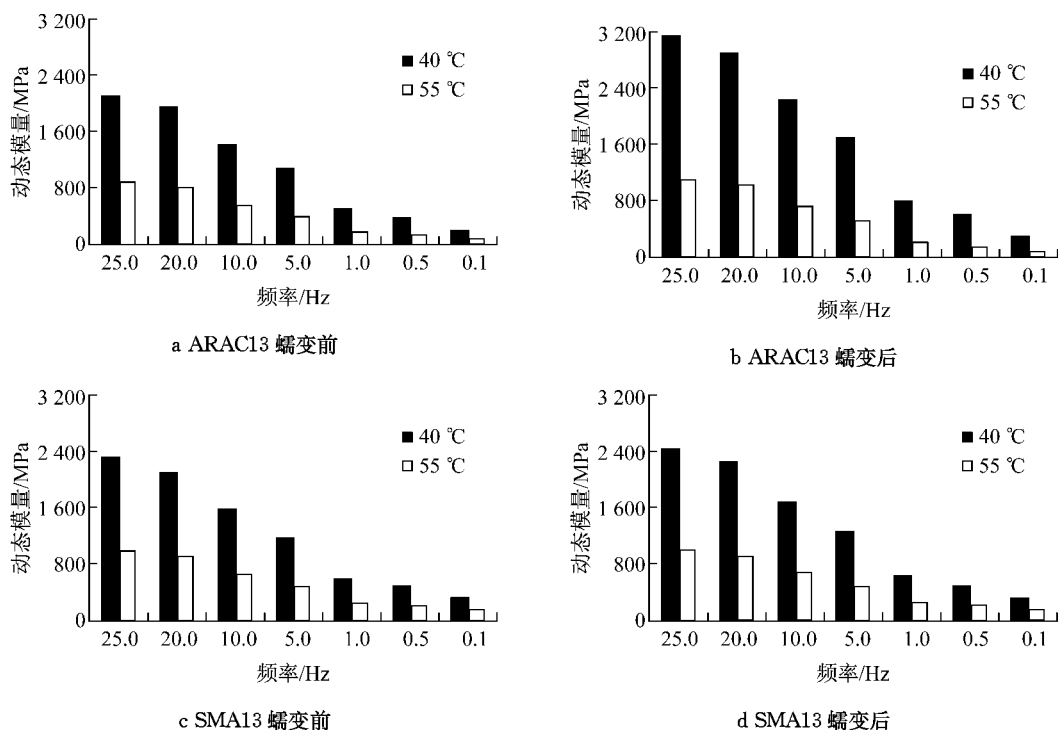


图 5 ARAC13 和 SMA13 动态模量试验结果

Fig. 5 Dynamic modulus results of SMA 13 and ARAC 13

从图 5 中看出, 在重复加载蠕变试验前 ARAC13 混合料的动态模量低于 SMA13; 在重复加载蠕变试验后 ARAC13 混合料的动态模量明显高于 SMA13. 重复加载蠕变试验后 ARAC13 的动态模量明显增加, 尤其是高频率试验条件下; 而 SMA13 的动态模量仅有微小的增加. 说明在车辙发展的 2 个阶段, 相对于 SMA13 混合料, ARAC13 混合料的力学性能发生了更明显的变化.

ARAC13 的力学性能在车辙发展的 2 个阶段具有明显的变化. 我国现行车辙试验不能充分模拟沥青混合料的初期压密特性, 对于车辙发展过程中力学性能没有明显变化的混合料是合适的, 但是对初

期压密后力学性能明显变化的 ARAC13 是不合理的. 重复加载蠕变试验可以反映围压对混合料压实性能的影响, 且作用时间较长, 更适合评价 ARAC13 车辙发展第 2 阶段的抗车辙性能.

## 5 工程验证

宁常高速公路是国家高速公路网中上海至洛阳国家重点公路的重要组成部分. 为了验证 ARAC13 的抗车辙性能, 在宁常高速公路 NC-22 标段使用了 ARAC13 作为上面层, 紧邻的 NC-21 和 NC-23 标段采用 SMA13 作为上面层. 表 5 为宁常高速公路

3个标段的路面结构.在ARAC13施工过程中,对其马歇尔试件体积指标进行了检测,检测结果都满足设计指标要求,2次检测平均孔隙率分别为5.37%和5.32%,表明ARAC13有较大的设计孔隙率.在

2008年和2011年对3个标段的第2车道进行了车辙测试,测试为10 m一个测点,3个标段车辙发展的趋势如图6所示.

表5 宁常高速公路的路面结构

Tab.5 Pavement structure of Ning-Chang Expressway

标段	桩号	上面层	中面层	下面层	面层厚度/cm
NC-21	K101+420~K128+000	4.5 cm 改性沥青 SMA13	6 cm 普通沥青 AC20	9 cm 改性沥青 AC25	19.5
NC-22	K128+000~K159+900	4.0 cm 橡胶沥青 ARAC13	6 cm 改性沥青 AC20	8 cm 普通沥青 AC25	18.0
NC-23	K156+900~K190+990	4.5 cm 改性沥青 SMA13	6 cm 改性沥青 AC20	9 cm 普通沥青 AC25	19.5

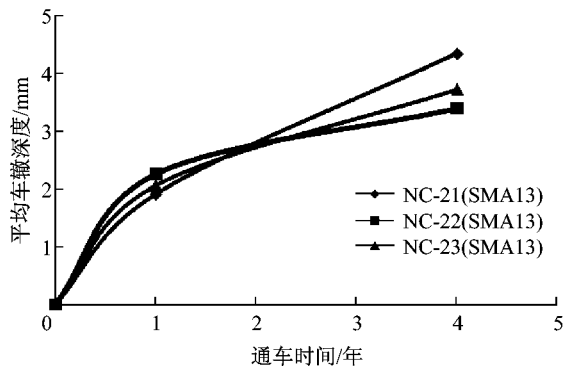


图6 现场检测车辙深度

Fig.6 Rutting depth of field test

通车1年后,相比SMA13路段,ARAC13路段车辙较大,说明ARAC13具有较大的压缩变形;但通车4年后,相比SMA13路段,ARAC13路段车辙相对较小,即在车辙发展的第2阶段ARAC13具有较好的抗车辙性能.间断级配橡胶沥青混合料重复加载蠕变试验的蠕变曲线与现场车辙发展趋势是相同的,说明重复加载蠕变试验2 000次后的应变-次数曲线斜率更适合评价ARAC13的抗车辙性能.综合重复加载蠕变试验、动态模量试验和工程验证结果表明ARAC13具有较好的抗车辙性能.

## 6 结 语

(1) 在初期压密阶段,ARAC13具有压缩变形大、模量低的特点;初期压密以后,ARAC13具有模量增大、抵抗车辙能力增强的特点.

(2) 采用我国现行车辙试验不能模拟围压作用下沥青混合料的压密过程,不适合评价ARAC13的抗车辙性能;重复加载蠕变试验2 000次后的应变-次数曲线斜率适合评价ARAC13的抗车辙性能.

(3) 工程应用验证了室内试验的结论,并表明ARAC13具有较好的抗车辙性能.

## 参考文献:

- [1] Ali Zarch, George B Way. Asphalt-rubber 40 years of use in Arizona[C]// Proceedings of Asphalt Rubber 2009 Conference. Nanjing: Beijing Kuntai Shiji Printing Co. Ltd., 2009: 26-45.
- [2] 王翼, 黄卫东. 美国橡胶沥青使用现状介绍[J]. 中外公路, 2009, 29(6): 274.  
WANG Yi, HUANG Weidong. Introduction of American asphalt rubber using status[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(6): 274.
- [3] Rongji Cao. Evaluation of new generation of gap graded asphalt rubber mixtures[C]// Proceedings of Asphalt Rubber 2009 Conference. Nanjing: Beijing Kuntai Shiji Printing Co. Ltd., 2009: 97-108.
- [4] 黄卫东, 王翼, 高川, 等. 橡胶沥青混合料的疲劳性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 1482.  
HUANG Weidong, WANG Yi, GAO Chuan, et al. Fatigue properties of asphalt rubber mixtures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(11): 1482.
- [5] 杨戈, 黄卫东, 李彦伟, 等. 橡胶沥青混合料高温性能评价指标的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 753.  
YANG Ge, HUANG Weidong, LI Yanwei, et al. Laboratory study on asphalt rubber mixture evaluation index for high temperature performance[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 753.
- [6] Liseane PTL Fontes, Glicerio Triches, Jorge C Pais, et al. Evaluating of permanent deformation in asphalt rubber mixtures[C]// Proceedings of Asphalt Rubber 2009 Conference. Nanjing: Beijing Kuntai Shiji Printing Co. Ltd., 2009: 269-284.
- [7] Ghazi Al-Khateeb, Imad Basheer. Utilising rutting performance data from the Hamburg Wheel-tracking Device (WTD) [J]. Road & Transport Research, 2009, 18(3): 32.
- [8] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
YAO Zukang. Structural design of asphalt pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.