

# 基于单轴贯入重复剪切试验的沥青混合料永久变形

许 严, 孙立军, 刘黎萍

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 沥青路面车辙变形越发严重, 降低路面使用寿命的同时大大影响行车安全. 通过对比分析, 提出运用单轴贯入重复剪切试验研究沥青混合料的永久变形. 对高速公路沥青路面上中面层最常用的4种沥青混合料进行了不同荷载水平下的单轴贯入重复剪切试验, 得到如下结论: 单轴贯入重复剪切试验可以做出沥青混合料的三阶段变形; 荷载越大混合料永久变形的速率越大, 剪切疲劳寿命或流动数越小, 当荷载大于或等于1.3 MPa时改性沥青混合料在较小的荷载次数内变形过大, 发生剪切破坏, 而当荷载小于或等于1.1 MPa时变形增加极慢, 稳定地处于变形的第二阶段而不破坏; 抗剪强度较大的沥青混合料抵抗剪切变形的能力较强, 改性沥青混合料抵抗剪切变形的能力远大于普通沥青混合料; 荷载应力水平和作用次数具有等效性.

**关键词:** 道路工程; 永久变形; 单轴贯入重复剪切试验; 三阶段变形; 抗剪强度

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

## Research on Asphalt Mixture Permanent Deformation by Single Penetration Repeated Shear Test

XU Yan, SUN Lijun, LIU Liping

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The pavement rutting is getting worse, which shortens the pavement service life, and the driving safety is therefore affected. A single penetration repeated shear test (SPRST) was proposed for a research on asphalt mixture permanent deformation on the basis of a comparative analysis. Many SPRST tests on different load levels were made with four kinds of the most commonly used asphalt mixtures in the upper and middle layer of asphalt pavements. Test results show that the three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixtures on loads can be obtained by SPRST. The bigger the load is, the faster the permanent deformation of

asphalt mixtures increases and the smaller the shear fatigue life or the flow number is. A larger load ( $\geq 1.3$  MPa) brings about large deformation without large load cycles and the mixture breaks; but the smaller load ( $\leq 1.1$  MPa) gives rise to a slow increase of deformation, which is stable in the second stage. The asphalt mixtures with bigger shear strength have a greater ability to resist the shear deformation than conventional asphalt. Load stress levels are equivalent to load cycles.

**Key words:** road engineering; permanent deformation; single penetration repeated shear test; three-stage permanent deformation; shear strength

## 1 研究背景

车辆荷载作用是影响路面使用寿命的关键因素之一, 它一般以车辆的总重, 轴重或轮重表征且均有一个许可值<sup>[1]</sup>. 近年来, 我国高速公路的调查表明超载超限问题非常严重, 呈现超载程度高、轮胎胎压高和重车比例大三个特点<sup>[2]</sup>. 随着这些问题的发生, 沥青路面的车辙变形越发严重, 造成路面过早损坏的同时也大大影响行车安全<sup>[3]</sup>. 故有必要在沥青混合料铺筑使用之前, 应用合适的试验方法研究其在不同荷载水平下的永久变形规律.

可用于研究沥青混合料永久变形的试验方法有小型往复式轮辙试验、大型环道试验、大型加速加载试验、蠕变试验等<sup>[4]</sup>. SHRP(美国战略公路研究计划)1991年发表的沥青路面永久变形研究报告<sup>[5]</sup>中提出选择用于沥青混合料永久变形研究的试验应具备以下条件: ①沥青路面的永久变形由混合料的剪切流动变形产生, 所以荷载在试件中产生的剪应力应与引起路面永久变形的剪应力相当; ②模拟实际

收稿日期: 2012-08-13

基金项目: 江西省交通运输厅科技资助项目(2009c0001)

第一作者: 许 严(1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为路面结构与材料. E-mail: xuyan719@yeah.net

通讯作者: 孙立军(1963—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为道路与交通工程. E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

路面交通荷载施加重复或者动态荷载;③可以获得混合料变形行为的力学信息;④试件制作简单且可以从路面钻心获取;⑤试验简单,花费较少.北美的加速加载试验证实<sup>[3]</sup>沥青混合料的永久变形发展规律一般分为三个阶段(图1):(1)初始阶段:荷载作用下发生迅速的塑形压密变形;(2)第二阶段:荷载的剪切作用下发生相对稳定的剪切变形;(3)第三阶段:即破坏阶段,剪切变形加剧,路面发生剪切破坏.所以试验中能否得到混合料的三阶段变形也是选择试验方法的重要参考<sup>[1]</sup>.

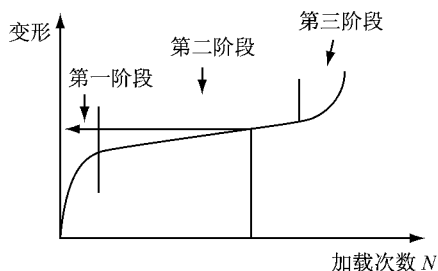


图1 沥青混合料永久变形的三阶段曲线

Fig.1 Three-stage permanent deformation curve of the asphalt mixture

三轴重复荷载永久变形试验采用重复荷载,对圆柱形试件施加固定围压,受力方式上通过提供轴向压力来考察混合料的抗剪切性能. NCHRP(美国公路合作研究组织)推荐使用三轴重复荷载试验研究沥青混合料的永久变形,并详细阐述了试验方法<sup>[6]</sup>. 黄晓明课题组对三轴重复荷载永久变形试验进行了研究,并提出了基于此试验的混合料弹黏塑-损伤力学模型<sup>[7-8]</sup>. 然而在三轴试验中,不仅应力分布与实际路面不同,而且无法确定侧压力(围压)的大小. 在路面结构中,材料之所以具有抗剪切能力,是因为具有沥青的粘结力、集料之间的嵌锁力和外围材料的侧向约束力,产生的侧向力大小因沥青混合料的性能不同而不同,因荷载的大小而不同<sup>[9]</sup>.

为了模拟实际路面的受力状态,毕玉峰<sup>[10]</sup>引入了一种全新的试验方法——单轴贯入试验. 单轴贯入试验将受单圆荷载作用的路面模型简化为一定尺寸的圆柱体,其上施加一定的荷载. 试验中采用直径为 28.5 mm 或 42.0 mm 的钢压头,对应的试件尺寸分别为  $\Phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  和  $\Phi 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 两组尺寸的压头和试件分别应用于最大公称粒径为 13.2 和 13.2 mm 以上的沥青混合料,加载速率为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . 通过单轴贯入试验获取最大贯入压力,乘以对应的强度参数,便可得到沥青混合料试件的抗剪强度. 相比其他试验,单轴贯入试验有以下特

点:①压头贯入混合料的受力模式与车轮在路面上的作用相似,产生的最大剪应力的的大小相近,相对深度位置接近;②由于压头尺寸远小于试件直径,受力部分沥青混合料的围压由周围混合料自然提供,围压随着荷载和混合料约束的不同而随之自然改变,而非三轴试验中施加的固定的围压;③试验方法易于操作,设备简单,便于工程应用.

通过对压头施加重复荷载即可以对沥青混合料进行重复剪切荷载下的永久变形试验,称之为单轴贯入重复剪切试验,产生的变形即为混合料的剪切变形或永久变形. 邵显智<sup>[11]</sup>采用单轴贯入重复剪切试验对 AC13 级配普通沥青混合料进行了研究,成功实现了沥青混合料的三阶段变形规律,并定义第二、三阶段的转变时的荷载作用次数为沥青混合料的剪切疲劳寿命,北美称之为流动数<sup>[6]</sup>. 袁峻<sup>[1]</sup>亦采用单轴贯入重复剪切试验对 AC13 级配普通沥青混合料进行了重点研究,提出了相同荷载作用次数下,沥青混合料的永久变形随着荷载和试验温度的提高,永久变形均增大的规律. 大量的实际路面调查发现沥青路面的车辙变形主要发生在上中面层<sup>[9]</sup>,且高等级道路的上中面层使用的沥青类型多为改性沥青,所以本研究对几种最常用的上中面层沥青混合料进行试验研究,探究不同荷载水平对沥青路面永久变形的影响.

## 2 不同荷载水平下沥青混合料永久变形

### 2.1 试验准备

作为面层材料,沥青混合料承受着各种车辆荷载的直接作用,荷载水平是影响其变形性能的最重要因素. 因此在不同的荷载条件下对面层沥青混合料的永久变形规律进行室内试验研究.

对于荷载水平,疲劳试验往往选用不同的应力比作为控制指标,即实际作用应力和极限应力的比值. 本文重点研究沥青混合料的永久变形,考虑到路面实际作用荷载的情况,同时考虑最不利的条件,将单轴贯入重复剪切试验的压应力定为  $0.7 \sim 1.5 \text{ MPa}$ ,每  $0.2 \text{ MPa}$  为一个梯度. 考虑到车辙的产生多发生于夏季高温季节,所以选取  $60^\circ \text{C}$  为统一试验温度. 图2为单轴贯入重复剪切试验图示.

试验中采用半正矢波加载,加载频率为  $10 \text{ Hz}$ ,波峰为拟加的荷载水平,波谷值为  $0.1 \text{ MPa}$ ,以防压头脱空,加载前预压  $10 \text{ s}$ ,荷载极限作用次数设定为

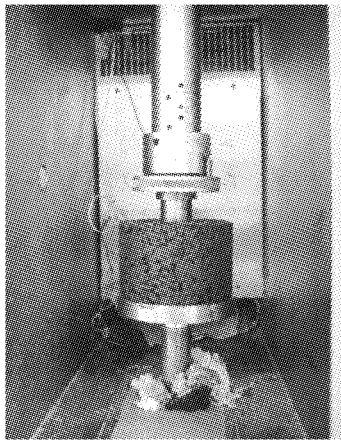


图 2 单轴贯入剪切疲劳试验装置

Fig.2 Test device of the single penetration shear fatigue test

100 万次. 沥青混合料类型和抗剪强度见表 1. 表中最后一列的抗剪强度由单轴贯入试验测得. 为了保

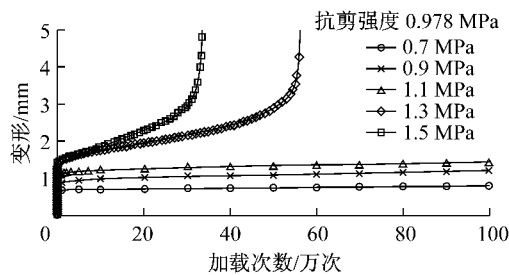


图 3 AC13-SBS 改性沥青混合料剪切变形

Fig.3 Shear deformation of AC13-SBS asphalt mixture

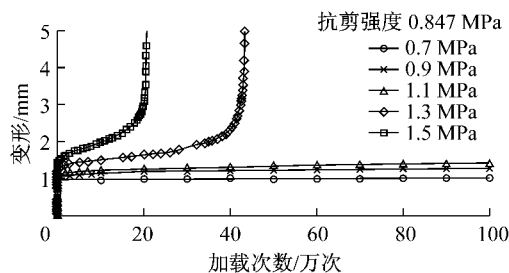


图 5 SMA13-SBS 改性沥青混合料剪切变形

Fig.5 Shear deformation of SMA13-SBS asphalt mixture

由图 3—6 可以得到如下结论:

(1)在荷载足够大,作用次数足够多的情况下,不同类型的沥青混合料在单轴贯入重复剪切试验中均可展现出完整的三阶段变形规律;

(2)荷载对沥青混合料的变形性能影响非常显著,在相同的作用次数下,4 种混合料的剪切变形均随着荷载的增大而增大. 对于三种结合料为 SBS 改性沥青的混合料,在 1.1 MPa 荷载以下(包括 1.1 MPa)时随着作用次数的增加,变形微小增长,且一直稳定地处于剪切变形的第二阶段;在 1.3 MPa 以

证试验结果的可比性,统一试验压头和试件的尺寸,用旋转击实仪成型试件高 100 mm,直径 150 mm,贯入压头直径为 42 mm.

表 1 试验用 4 种沥青混合料

Tab.1 Four types of asphalt mixtures for test

编号	级配类型	沥青类型	油石比 /%	空隙率 /%	抗剪强度 /MPa
1	AC13	SBS 改性沥青	4.9	4.1	0.978
2	AC20	SBS 改性沥青	4.3	4.0	1.010
3	SMA13	SBS 改性沥青	6.0	3.6	0.847
4	AC20	70# 普通沥青	4.4	4.3	0.490

## 2.2 试验结果汇总与分析

### 2.2.1 不同荷载作用下沥青混合料剪切疲劳变形的变化规律

4 种沥青混合料在不同荷载作用下剪切变形随着荷载作用次数增加的变化规律见图 3—6.

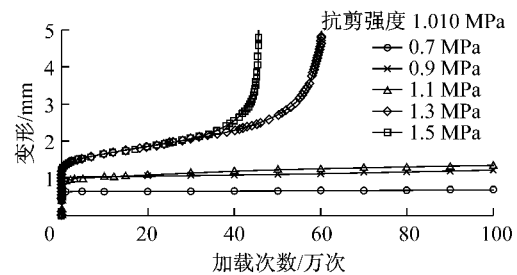


图 4 AC20-SBS 改性沥青混合料剪切变形

Fig.4 Shear deformation of AC20-SBS asphalt mixture

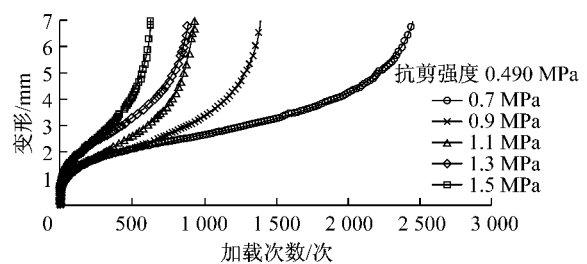


图 6 AC20-70# 普通沥青混合料剪切变形

Fig.6 Shear deformation of AC20-70# asphalt mixture

上(包括 1.3 MPa)时随着作用次数的增加,混合料先后经历了剪切变形的三阶段至完全破坏,且荷载越大,剪切变形发展的越快. 对于结合料为普通沥青的混合料,在非常小的作用次数下(<3 000 次)混合料便发生了完整的三阶段变形,且荷载越大,剪切变形发展得越快.

(3)沥青种类对于混合料抗剪切变形的影响非常大. 以上述 4 种混合料为例,SBS 改性沥青为结合料的混合料在 1.5 MPa 荷载作用下明显进入剪切变形第三阶段的最低作用次数也在 10 万次以上,而普

通沥青为结合料的混合料在 0.7 MPa 荷载作用下明显进入剪切变形第三阶段的作用次数仅为 1 500 次左右. 可见改性沥青比普通沥青对于混合料抵抗剪切变形起到更大的作用.

(4) 过大的荷载 ( $\geq 1.3$  MPa) 会造成沥青混合料过早发生较大的剪切变形, 所以超载严重的汽车对于沥青路面有非常大的破坏性.

### 2.2.2 沥青混合料抗剪强度大小与抵抗剪切变形能力的关系

由单轴贯入试验得出的抗剪强度可以很好地反映沥青混合料的抗剪性能<sup>[11]</sup>. 图 7 为不同抗剪强度的三种混合料在 1.5 MPa 荷载作用下剪切变形的比较. 图中黑色竖线与横轴的交点为采用线性逼近法得到的第二、三阶段的过渡点对应的荷载作用次数, 此次数即为混合料的疲劳寿命或流动数. 由图可知, 相同荷载作用次数时, 抗剪强度较小的沥青混合料剪切变形较大; 抗剪强度较大的沥青混合料, 剪切疲

劳寿命或流动数亦较大. 所以抗剪强度较大的沥青混合料抵抗剪切变形的能力也较强.

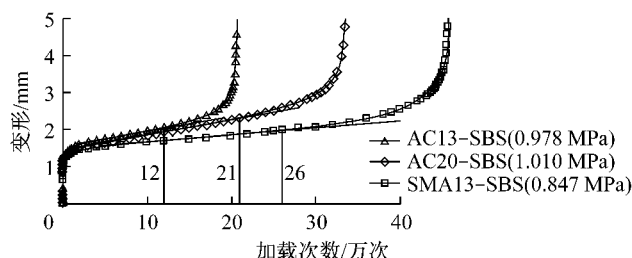


图 7 1.5 MPa 荷载作用下三种改性沥青混合料剪切变形  
Fig. 7 Shear deformation of 3 types of modified asphalt mixtures on the load of 1.5 MPa

### 2.2.3 剪切疲劳试验中荷载作用次数与荷载大小的关系

图 8—11 为相同荷载次数不同荷载应力时混合料的变形规律.

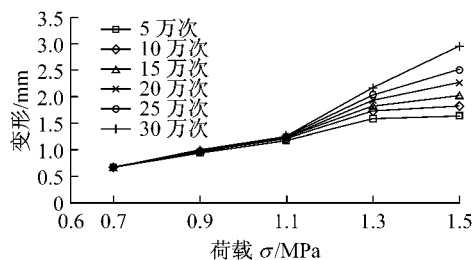


图 8 AC13-SBS 改性沥青混合料相同作用次数不同荷载应力下的变形量

Fig. 8 Shear deformation of different load stresses with the same load recycles of AC13-SBS asphalt mixture

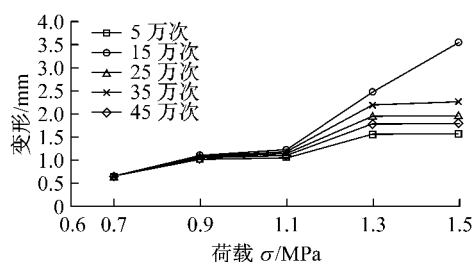


图 9 AC20-SBS 改性沥青混合料相同作用次数不同荷载应力下的变形量

Fig. 9 Shear deformation of different load stresses with the same load recycles of AC20-SBS asphalt mixture

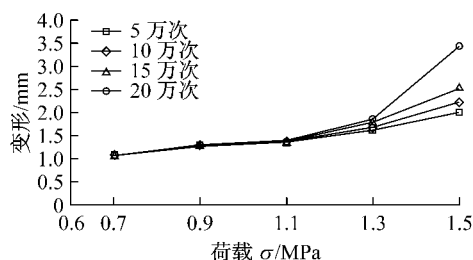


图 10 SMA13-SBS 改性沥青混合料相同作用次数不同荷载应力下的变形量

Fig. 10 Shear deformation of different load stresses with the same load recycles of SMA13-SBS asphalt mixture

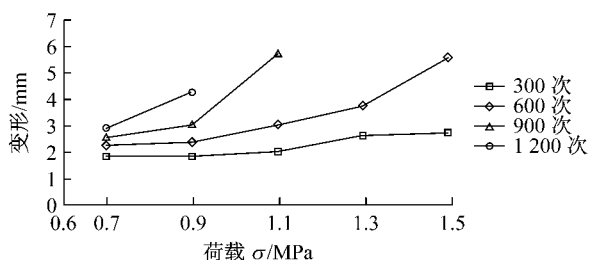


图 11 AC20-70# 普通沥青混合料相同作用次数不同荷载应力下的变形量

Fig. 11 Shear deformation of different load stresses with the same load recycles of AC20-70# asphalt mixture

从图 8—11 可以看出, 沥青混合料的剪切变形受到荷载应力大小以及荷载作用次数的共同影响, 较大应力下的小作用次数和较小应力下多作用次数

可以达到相同的作用, 可称为荷载应力大小和作用次数的等效性. 这种等效性在普通沥青混合料和作用荷载较大的改性沥青混合料中体现较为明显.

### 3 总结

单轴贯入试能够很好地模拟实际路面在车轮荷载作用下的受力方式,是评价沥青混合料抗剪性能非常合理的试验方法.通过对单轴试验的压头施加重复荷载可以研究沥青混合料在剪切应力作用下的永久变形规律,称为沥青混合料的单轴贯入重复剪切试验.

车辙多发生于沥青路面的上中面层,对高等级路面最常用的4类上中面层沥青混合料进行单轴贯入重复剪切试验,得到以下结论:

(1)单轴贯入重复剪切试验可以做出沥青混合料的三阶段变形.

(2)沥青混合料的剪切疲劳寿命随着荷载的增大而减小,且荷载越大永久变形产生的速率就越大.

(3)改性沥青混合料抵抗剪切变形的能力大大强于普通沥青混合料.

(4)对于改性沥青混合料,当荷载大于或等于1.3 MPa时,混合料在有限的次数下发生了较大的永久变形,出现了完整的三阶段变形过程;而当荷载小于或等于1.1 MPa时,随着作用次数的增加,变形微小增长,且一直稳定地处于剪切变形的第二阶段.所以过度超载的车辆可能会在较短的时间内对路面造成较大的损坏,大大降低路面的使用寿命.

(5)抗剪强度较大的沥青混合料,抵抗剪切变形的能力较强.在试验条件受限的情况下,可以使用抗剪强度指标来间接反映混合料抵抗剪切变形的能力.

(6)荷载应力水平和作用次数之间具有等效性,这种等效性在普通沥青混合料和作用荷载级位较大的改性沥青混合料中体现较为明显.

### 参考文献:

[1] 袁峻. 沥青混合料永久变形若干影响因素试验研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2007.  
YUAN Jun. Experimental research on influence factors of permanent deformation of asphalt mixture [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2007.

2009.  
[2] 尹谨学. 沥青路面重在特征及对路面设计影响研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2009.  
YIN Jinxue. Research on axle load characteristics of asphalt mixture pavement and effect on pavement design [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2009.  
[3] ZHOU Fujie, Scullion Tom, SUN Lijun. Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 2004, 130(4): 486.  
[4] 杜顺成, 戴经梁. 沥青混合料永久变形评价指标[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 198.  
DU Shuncheng, DAI Jingliang. Permanent deformation evaluation index of asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 198.  
[5] Sousa J B, Craus J, Monismith C L. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete [R]. Washington D C: SHRP, 1991.  
[6] Witczak M W, Kaloush K, Pellinen T, et al. NCHRP report 465: simple performance test for superpave mix design[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2002.  
[7] 张久鹏, 黄晓明, 李辉. 重复荷载作用下沥青混合料的永久变形[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 511.  
ZHANG Jiupeng, HUANG Xiaoming, LI Hui. Permanent deformation of asphalt mixture under repeated load[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(3): 511.  
[8] 张久鹏, 黄晓明. 沥青混合料永久变形的弹黏塑-损伤力学模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(1): 185.  
ZHANG Jiupeng, HUANG Xiaoming. Visco-elastic-plastic damage mechanics model of permanent deformation in asphalt mixture [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(1): 185.  
[9] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
SUN Lijun. Structure behavior study of asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.  
[10] 毕玉峰. 沥青混合料抗剪试验方法及抗剪参数研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2004.  
BI Yunfeng. Research on test method and parameters of asphalt mixture's shearing properties [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2004.  
[11] 邵显智. 沥青混合料抗剪性能影响因素及剪切疲劳试验方法研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2005.  
SHAO Xianzhi. The influence factors and fatigue experiment analysis for shear properties of asphalt mixtures [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2005.