

文章编号: 1671-1637(2008)06-0024-05

# 钢桥面铺装混合料三轴重复加载试验变形特性

杨 军<sup>1</sup>, 朱浩然<sup>1</sup>, 崔 娟<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省交通规划设计院, 江苏 南京 210005)

**摘要:** 为了研究钢桥面铺装材料的高温变形特性及其车辙预估方法, 针对 MA 及 SMA 两种钢桥面铺装混合料, 采用三轴重复加载试验评价其高温性能, 并根据试验结果, 通过多元线性回归得到材料的非线性计算模型参数, 使用 ABAQUS 有限元软件, 模拟三轴试验过程, 将计算变形与实测变形相比较。发现两种混合料高温变形发展规律以及对不同荷载条件的响应方式不同, SMA 具有优异的高温抗变形能力; 有限元模拟的误差约为 10%。分析结果表明: 采用三轴重复加载试验和多元线性回归确定材料的非线性计算模型参数的方法可靠, 模型参数可用于沥青桥面铺装的车辙变形预估。

**关键词:** 路面工程; 钢桥面铺装; 三轴重复加载试验; 有限元方法; 高温性能

**中图分类号:** U 414.1      **文献标识码:** A

## Deformation properties of asphalt mixtures for steel bridge deck through repeated load triaxial test

YANG Jun<sup>1</sup>, ZHU Hao-ran<sup>1</sup>, CUI Juan<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute, Nanjing 210005, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to study the deformation properties of steel deck pavement under high temperature and their rutting predictions, two types of asphalt mixtures, mastic asphalt (MA) and stone mastic asphalt (SMA), were invited, and their high temperature performances were evaluated through repeated load triaxial test (RLTT). Through the multivariate linear regressive analysis of test result, the nonlinear parameters of asphalt mixtures were obtained, finite element software ABAQUS was applied to simulate the process of RLTT, and the calculated deformation and measured deformation were compared. It is found that the natures of high temperature deformation developments for two mixtures, as well as the response manners to different load conditions, are completely different, SMA has an overwhelmingly excellent deformation resistance, and the calculation error of FEM is about 10%. The result indicates that it's reasonable to get the nonlinear parameters through multivariate linear regressive analysis from RLTT result, and it's qualified to apply these parameters to conduct the rutting prediction of asphalt pavement on steel bridge. 8 tabs, 9 figs, 10 refs.

**Key words:** pavement engineering; steel deck pavement; repeated load triaxial test; finite element method; high temperature performance

**Author resume:** YANG Jun(1968-), female, professor, +86-25-83794069, yangjun@seu.edu.cn.

收稿日期: 2008-06-26

基金项目: 教育部留学回国人员基金项目(6821001005)

作者简介: 杨 军(1968-), 女, 江苏扬州人, 东南大学教授, 从事路面新材料和新工艺研究。

## 0 引言

沥青路面的高温稳定性问题一直是道路界研究的热点和难点, 而评价沥青混合料高温稳定性的试验方法有很多种, 如单轴、三轴、径向静载与动载试验, 简单剪切试验, 中空圆柱试件的动剪试验, 弯曲蠕变梁试验, 车辙试验, 大型环道、直道试验和现场加速加载试验等<sup>[1-3]</sup>。经过对比分析可知, 作为一种相对简单的室内试验研究方法, 三轴重复加载试验能够较好地模拟实际路面状态, 试验过程中可测得诸多能够反映混合料性能的数据特性, 包括蠕变劲度模量、回弹模量、动力模量、泊松比、永久变形与荷载作用次数的关系等, 获得的典型蠕变曲线见图 1。该曲线可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段是压密阶段, 材料空隙减少, 应变增大, 变形速率逐渐减少; 第 2 阶段是稳定发展阶段, 变形速率保持稳定; 第 3 阶段是剪切破坏阶段, 材料结构逐渐损坏, 强度丧失, 造成整体破坏, 变形急剧增大是破坏阶段的开始。

美国 BARKSDALE 等的一项研究发现<sup>[4]</sup>, 三轴重复荷载试验所得数据更能反映路面的变形特征, 按照壳牌方法的蠕变试验, 某混合料的沥青用量从

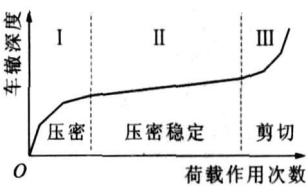


图 1 沥青混合料蠕变曲线

Fig. 1 Creep curve of asphalt mixture

4.5% 增加到 5.5%, 车辙深度没有显著的增加, 但采用三轴重复荷载试验, 车辙深度增加了 16%。国外研究也表明<sup>[5]</sup>, 三轴试验主要有如下优点。

(1) 试件中的应力应变状态相对均匀。

(2) 通过变化偏应力(轴压与围压之差)和围压可得到较大范围的应力条件, 表明路面中遇到的大多数应力状态都可以实现。

(3) 采用动态轴向加载可以实现实际交通荷载条件。

(4) 应变元素(弹性、塑性和粘弹性)可通过一系列变化时间的蠕变/恢复试验得到。

基于以上诸多方面的优点, 本文中采用该试验评价混合料的高温性能, 并根据试验的数据结果, 通过多元线性回归得到材料的非线性参数, 利用 ABAQUS 有限元软件对三轴试验过程进行模拟, 并与试验结果比较, 以检验有限元模拟的可行性。

## 1 原材料的选择与配合比设计

### 1.1 原材料的选择

集料均采用质地优良的花岗岩, 性质见表 1、2; SMA 胶结料采用聚合物改性沥青, 性质见表 3; 根据以往研究成果及成功经验<sup>[6-8]</sup>, MA 胶结料采用 Shell 60/70 沥青与湖沥青按比例 30 : 70 进行掺配的合成沥青, 性质见表 4。

表 1 粗集料性质

技术指标	试验结果	技术标准	试验方法
洛杉矶磨耗值/%	20.2	≤30	JTJ 058-2000(T0317-2000)
针片状含量/%	0.75	≤25	JTJ 058-2000(T0317-2000)
压碎值/%	8.6	≤12	JTJ 058-2000(T0316-2000)
粘附性/级	4	≥4	JTJ 058-2000(T0616-1993)
吸水率/%	0.8	≤2	JTJ 058-2000(T0330-2000)
坚固性/%	0.5	≤12	JTJ 058-2000(T0340-1994)
软石含量/%	0.3	≤1	JTJ 058-2000(T0320-2000)
<0.075 颗粒含量/%	0.2	≤1	JTJ 058-2000(T0303-2000)

表 2 细集料性质

技术指标	试验结果	技术标准	试验方法
吸水率/%	0.7	≤1.5	JTJ 058-2000(T0330-2000)
坚固性/%	0.41	≤5.0	JTJ 058-2000(T0340-1994)
砂当量/%	63	≥60	JTJ 058-2000(T0334-1994)

表 3 SMA 用改性沥青性能

指标	结果	要求	试验方法
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1mm	53	50~70	BSEN-1426
软化点(R & B)/°C	80	≥70	BSEN-1427
粘度(135 °C)/(Pa · s)	1.6		AASHTO T201-T202
RTFOT 质量损失/%	0.045	≤1.0	BSEN 12607-1
10 °C 弹性恢复/%	81	≥65	ASTM D6084-97

表 4 MA 用沥青性质

检测项目	试验结果			试验方法
	Shell 沥青	湖沥青	合成沥青	
视密度(25 °C)	1.033	1.400	1.290	ASTM D70
软化点(环球法)/°C	49.2	93.0	68.0	IP58
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1 mm	63	0	13	ASTM D5
延度(25 °C)/cm	>150			ASTM D113
RTFOT 质量损失/%	<0.05	0.24	0.50	ASTM D2872
三氯乙烯溶解度/%	99.98	52.60	68.00	ASTM D3042
粘度(100 °C)/(Pa · s)	4.438			ASTM D2171
粘度(135 °C)/(Pa · s)	0.490			ASTM D2171
闪点/°C	>300			ASTM D92
矿粉含量/%		36.29	26.00	BS 2000-223

## 1.2 配合比设计

本文中,SMA 和 MA 的配合比设计参考了丹麦和英国桥面铺装相关技术标准,见表 5、6。

表 5 SMA11 配合比

Tab-5 Mix proportion of SMA11

筛孔	通过方孔筛(mm)的质量百分率/%							沥青含量/%
	14	11.2	8	5.6	2	1	0.075	
合成级配	100	94	44	29	22	19	13	6.5
级配范围	100	86~98	38~50	22~34	16~24	13~21	9~13	

表 6 MA 配合比

Tab-6 Mix proportion of MA

筛孔	通过方孔筛(mm)的质量百分率/%							沥青/沥青玛蹄脂/%
	14	10	6.3	2.36	0.6	0.212	0.075	
合成级配	100	100	51	51	46	36	24	14.5
级配范围	100	95~100	46~56	46~56	43~49	33~39	22~26	

## 2 三轴重复加载试验

### 2.1 试验方法

试验设备采用 UTM (Universal Test Machine), 见图 2。SMA 采用的试件尺寸为  $\Phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 以旋转压实方法成型并钻芯得到试件; 对于 MA 采用的试件尺寸为  $\Phi 101.6 \text{ mm} \times 63.5 \text{ mm}$ 。

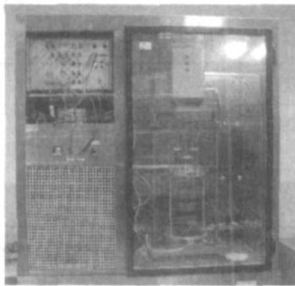


图 2 UTM

Fig-2 UTM

考虑到材料的非线性特性, 对于 SMA, 偏应力(轴向压应力与围压的差)分别采用 0.3、0.5、0.7 MPa, 同时, 为了考虑实际铺装中超载对车辙的影响, 本文还进行了偏应力 0.9、1.1 MPa 条件下的三轴试验。对于 MA, 由于其高温稳定性能不足, 变形较大, 偏应力不宜太大, 分别为 0.3、0.5、0.7 MPa。试验中偏应力的变化能体现实际铺装中不同轴载及不同位置处材料的变形特性。

与变化偏应力相似, 不同应力水平的围压也能体现材料的非线性特性, 更接近实际铺装层的受力状况。根据国外研究结果, BROWN 等建议有侧限试验<sup>[9]</sup>, 围压应力取 138 kPa, 轴向应力取 0.827 MPa; KALOUSH 考虑 2 种路面结构: 半空间体与多层体系, 其中均质半空间体的应力可以求出解析解, 多层体系的应力通过计算机程序 ELSYM<sup>5</sup> 求解, 研究结果也表明围压为 138 kPa 适合三轴试验, 能较好地符合路面的受力状

态<sup>[3]</sup>。本文为了便于比较试验结果, 围压一律采用 138 kPa。

在正式试验前以 20 kPa 预压 60 s 以消除接触空隙, 加、卸载时间均为 1 s, 采用方波进行三轴重复加载试验。为模拟钢桥面沥青铺装所处的恶劣环境, 试验温度为 60 °C。

### 2.2 试验结果

试验结果见图 3~5。由图 3 可以看出, 偏应力较小时, SMA 沥青混合料变形发展十分缓慢, 最终变形很小; 随着偏应力的增大, 初始的变形增大, 变形速率也增大, 导致最终变形增大; 偏应力增大时, 混合料变形较早地进入第 3 阶段, 达到破坏。通常认为低荷载条件对路面的影响很小, 而超载很容易破坏路面, 本试验也验证了该结论。

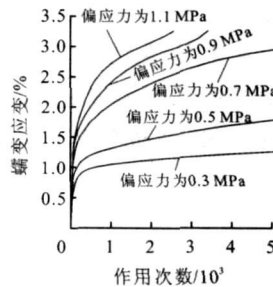


图 3 SMA 变形曲线

Fig-3 Deformation curves of SMA

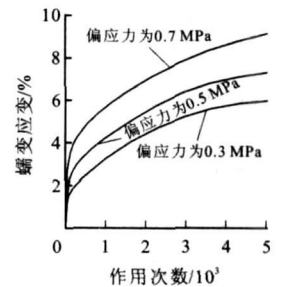
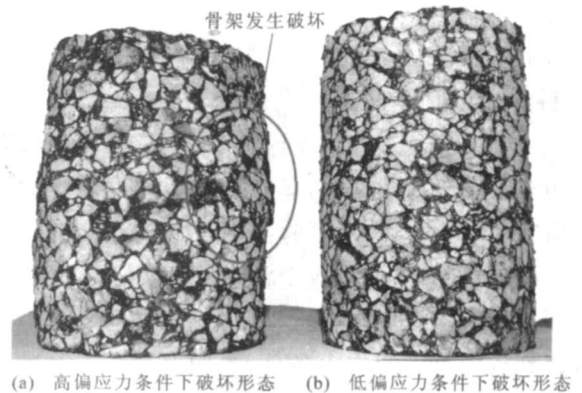


图 4 MA 变形曲线

Fig-4 Deformation curves of MA



(a) 高偏应力条件下破坏形态 (b) 低偏应力条件下破坏形态

图 5 SMA 三轴重复加载蠕变试验结果

Fig-5 Result of repeated load triaxial test on SMA

试验中, SMA 试件典型的破坏形态见图 5。SMA 属于骨架密实结构的沥青混合料, 其抗车辙能力主要来源于混合料中粗集料间相互嵌挤的作用及沥青玛蹄脂的胶结性能。由图 5 可见, 在偏应力较高条件下, 试件经过一定次数的荷载作用后, 粗集料形成的骨架发生破坏, 丧失抵抗变形的能力, 变形发展较快; 而在偏应力较低条件下, 试件经过较长时间的荷载作用后仍持有较好的骨架结构, 总体高温变形仍较小。

由图 4 可以看出, 相对于 SMA, MA 属于悬浮密实结构, 抗变形能力远低于 SMA, 在相同应力条件下, 变形远大于 SMA。其对荷载作用的响应方式也与 SMA 不同, 即使在较低偏应力水平下, 变形仍保持较高的发展速率, 无变形稳定发展阶段, 最终变形比较大, 其变形曲线与高偏应力条件下的 SMA 相似。

### 3 有限元模拟分析

#### 3.1 有限元模型

以 SMA 试件为例, 基于结构和荷载特点, 按照对称问题来建立有限元模型, 见图 6, ABAQUS 中模型见图 7, 单元类型选用线性缩减积分单元, 即 CAX4R。

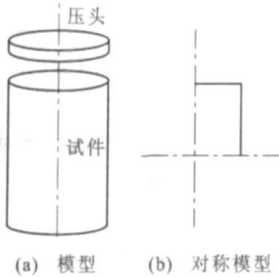


图 6 三轴重复加载试验的简化模型  
Fig. 6 Simplified model of repeated load triaxial test

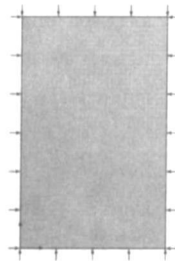


图 7 有限元简化模型  
Fig. 7 Simplified finite element model

#### 3.2 材料参数

本文采用 ABAQUS 中的蠕变模型来模拟沥青混凝土层, 其对材料的高温流变特性描述如下<sup>[10]</sup>。

材料的变形  $\epsilon_c$  表示为温度  $T$ 、应力  $\sigma$  和时间  $t$  的函数, 即

$$\epsilon_c = f(T, \sigma, t) \quad (1)$$

通常采用 Bailey-Norton 规律分析材料变形, 其表达式为

$$\dot{\epsilon}_c = A\sigma^m t^n \quad (2)$$

式中:  $\dot{\epsilon}_c$  为应变速率, 即单位时间产生的应变;  $\sigma$  为轴向偏应力, 即轴向压力与围压的差;  $t$  为荷载累计作用时间, 对于本文中的试验, 加、卸载均为 1 s, 因此, 荷载作用  $N$  次, 累计作用时间即为  $N$  s;  $A$ 、 $m$ 、 $n$  为与材料性质有关, 并依赖于温度及应力水平, 可以通过材料试验确定的参数。

本文通过三轴重复加载永久变形试验, 得到材料蠕变结果, 并通过多元线性回归, 得到式(2)中参数  $A$ 、 $m$  和  $n$ 。

考虑到沥青材料的非线性特性, 本文利用不同

应力水平下的三轴试验数据进行回归。对于 SMA, 偏应力分别为 0.3、0.5、0.7 MPa, 得到 60 °C 时蠕变参数  $A$ 、 $m$  和  $n$ ; 再分别利用偏应力为 0.5、0.7、0.9 MPa 和 0.7、0.9、1.1 MPa 模拟不同程度的超载情况, 回归材料参数; 对于 MA, 利用偏应力为 0.3、0.5、0.7 MPa 的试验结果回归参数。沥青混合料的非线性蠕变材料参数见表 7。

表 7 材料参数

Tab. 7 Material parameters

混合料类型	试验条件			材料非线性参数		
	偏应力/MPa	围压/kPa	温度/°C	$A$	$m$	$n$
SMA	0.3、0.5、0.7	138	60	$2.51 \times 10^{-10}$	-0.763	1.132
	0.5、0.7、0.9			$3.04 \times 10^{-10}$	-0.757	1.144
	0.7、0.9、1.1			$3.49 \times 10^{-10}$	-0.748	1.148
MA	0.3、0.5、0.7			$3.26 \times 10^{-9}$	-0.713	1.064

#### 3.3 有限元计算结果与试验结果比较

以应力条件为 0.7 MPa 的 SMA 和应力条件为 0.3 MPa 的 MA 试验为例, 在 ABAQUS 的模型中输入相应的材料参数, 得到图 8 计算结果。

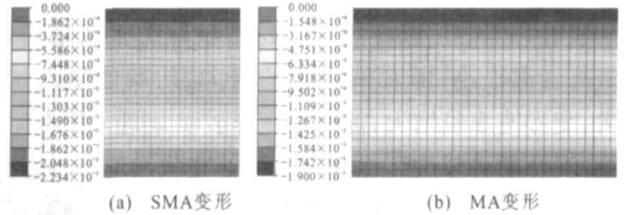


图 8 有限元方法计算竖向变形

Fig. 8 Vertical deformations calculated by FEM

同时, 可得到竖向变形随时间的发展过程, 将计算结果与实测数值同时绘于图 9, 可以看出荷载作用时间比较短时, 两者比较接近, 而随着时间的发展, 计算结果与实测结果间差值逐渐增大。

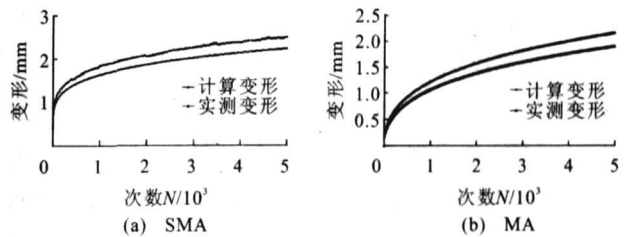


图 9 计算及实测变形发展

Fig. 9 Developments of calculated deformation and measured deformation

将 5 000 次荷载作用后的有限元计算结果与试验结果作比较(因本模型已简化, 需将计算所得变形乘以 2, 便得最终变形), 见表 8。对于 0.9、1.1 MPa 的超载情况, 有限元计算值分别为 5.954、7.579 mm, 而试验中试件在 3 000 次荷载作用后即进入破坏阶

段,变形迅速增大,但有限元方法中的计算模型无法表征该特点,其计算值远小于试验最终变形。对于其他荷载情况,计算结果与试验值较接近,误差在 10% 左右,因此,用 ABAQUS 模拟沥青混合料的高温变形是可靠的。在实际钢桥面沥青铺装中,不允许车辙变形发展过大,乃至破坏,所以将有限元技术用于钢桥面沥青铺装的车辙预估研究也是可行的。

表 8 变形计算值与实测值的比较

Tab.8 Comparison of calculated deformation and measured deformation

对比	偏应力/MPa						
	SMA				MA		
	0.5	0.7	0.9	1.1	0.3	0.5	0.7
试验结果/mm	3.334	5.026			4.335	5.326	6.730
计算结果/mm	2.985	4.468	5.954	7.579	3.806	4.692	5.836
误差/%	10.47	11.10			12.23	11.90	13.28

## 4 结 语

(1)通过三轴重复荷载永久变形试验,发现对于 SMA,偏应力较小时,混合料变形发展十分缓慢,经过较长时间的荷载作用后仍持有较好的骨架结构,最终变形很小;随着偏应力的增大,初始的变形增大,变形速率也增大,混合料变形较早地进入第 3 阶段,混合料骨架破坏。这在实际铺装状况下,反映为低荷载条件对铺面的影响很小,而超载很容易造成铺面破坏。

(2)MA 属于悬浮密实结构,其抗变形能力远低于 SMA,对荷载作用的响应方式也与 SMA 不同,即使在较低偏应力水平下,变形仍保持较高的发展速率,无稳定发展阶段,最终变形比较大,其变形曲线与高偏应力条件下的 SMA 相似。

(3)根据三轴试验结果,通过多元线性回归得到材料的非线性计算模型参数  $A$ 、 $m$  和  $n$ ,利用 ABAQUS 有限元方法,模拟三轴试验过程,发现该方法无法表征混合料变形发展的第 3 阶段,但对于之前的变形过程,模拟效果较好,误差在 10% 左右,说明材料参数及该有限元模型中的参数设置正确,可进一步对沥青桥面铺装的车辙变形进行预估分析。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 沈金安. 沥青与沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 陈忠达, 袁万杰, 薛航, 等. 沥青混合料高温性能评价指标[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 1-4.  
CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, XUE Hang, et al. High temperature stability index of hot mixed asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 1-4. (in Chinese)
- [3] 岳学军, 黄晓明. 沥青混合料高温稳定性评价指标的试验研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(10): 37-40.  
YUE Xue-jun, HUANG Xiao-ming. Experiment research on high-temperature deformation indexes of asphalt mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(10): 37-40. (in Chinese)
- [4] BARKSDALE R D, MILLER J H. Development of equipment and techniques for evaluating fatigue and rutting characteristics of asphalt concrete mixes[R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1977.
- [5] KALOUSH K E. Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures[D]. Tempe: Arizona State University, 2001.
- [6] 邓学钧. 中国江阴长江大桥桥面沥青铺装层高温稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 1-7.  
DENG Xue-jun. Asphalt pavement stability at high-temperature for the Jiangyin bridge in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 1-7. (in Chinese)
- [7] 张祥, 李洪涛, 赵永军. 江阴长江公路大桥钢桥面铺装设计[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(5): 68-71.  
ZHANG Xiang, LI Hong-tao, ZHAO Yong-jun. Pavement design of Yangtze river highway bridge in Jiangyin[J]. Railway Standard Design, 2005, 49(5): 68-71. (in Chinese)
- [8] 吴光蓉, 牟建波, 陈仕周, 等. 钢桥桥面铺装方案环道试验研究[J]. 公路, 2001, 46(1): 20-23.  
WU Guang-rong, MU Jian-bo, CHEN Shi-zhou, et al. Study on circular track test of steel deck pavement scheme[J]. Highway, 2001, 46(1): 20-23. (in Chinese)
- [9] BROWN S F, COOPER K E. The Mechanical properties of bituminous materials for road bases and base courses[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1984, 53(4): 10-15.
- [10] 黄菲. 沥青路面永久变形数值模拟及车辙预估[D]. 南京: 东南大学, 2006.