

# 基于黏弹性理论的沥青罩面层力学响应研究

曹毅,魏连雨,马士宾,于欢

河北工业大学土木工程学院,天津 300401

**摘要** 根据黏弹性理论构建沥青罩面层三维黏弹性有限元模型,运用大型有限元软件 ABAQUS 进行动态荷载试验,研究了沥青罩面层的力学响应。结果表明,沥青罩面层由于其本身的黏弹性,在动态荷载作用下会产生与弹性材料不同且更为复杂的应力响应,应力状态随加载和卸载而不断变化,加载时其表面为压应力,底层为拉应力,卸载时则相反,其表面为拉应力,底层为压应力;循环荷载下沥青罩面层受压应力和拉应力的交替重复作用,其表面和层底会产生残余应力,随温度的升高,其松弛模量增强,黏弹性减弱,残余应力逐渐减小。相对于把沥青罩面层作为弹性材料的方法,基于黏弹性的分析方法能够更准确地描述沥青罩面层的力学行为特征。

**关键词** 沥青罩面层;力学响应;黏弹性;三维有限元

**中图分类号** TL372.3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.32.003

## Mechanical Response of Asphalt Mixture Overlay Based on Viscoelastic Theory

CAO Yi, WEI Lianyu, MA Shibin, YU Huan

College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

**Abstract** A three-dimensional viscoelastic finite element model of asphalt overlay was constructed based on the viscoelastic characteristics of asphalt mixture, and dynamic loading tests were performed by using the finite element software ABAQUS. The results show that, a different and more complex mechanical response than that of elastic material is generated because of the viscoelastic characteristic of asphalt mixture overlay itself. The stress state changes with the loading and unloading process—a compressive stress is generated on the surface, and a tensile stress is on the bottom surface when loading. The unloading process is on the contrary. A residual stress will be generated on the surface and the bottom surface under the alternately repeated compressive stress and tensile stress. Furthermore, the residual stress decreases with increasing the temperature, while the relaxation capacity increases and the viscoelasticity decreases. This method gives a more accurate and scientific description on the mechanical behavior feature of asphalt overlay than treating the asphalt mixture overlay as an elastic material.

**Keywords** asphalt mixture overlay; relaxation modulus; viscoelasticity; three-dimensional finite element

### 0 引言

沥青混凝土罩面层是在符合强度要求的旧路面上所加铺的沥青混合料薄处理层<sup>[1]</sup>。大部分资料在路面结构的力学分析研究中,忽略了沥青混合料的黏弹性特征,通常采用层状弹性理论,把沥青罩面层转化为线弹性材料进行结构设计与力学响应分析。这不可避免地造成分析结果与沥青罩面层实际力学行为的不符,从而影响沥青罩面层使用性能的研究<sup>[2]</sup>。

本文根据沥青混合料的黏弹性特性,利用黏弹性材料三

维有限元模型和有限元软件 ABAQUS,通过模拟试验,分析研究沥青罩面层在动态荷载下的黏弹性应力状态,以为更科学地描述沥青罩面层的力学特征与破坏机理奠定基础。

### 1 三维黏弹性有限元模型

旧路改造的沥青罩面层材料参数见表 1。由于虚位移原理是否成立与本构关系无关<sup>[1]</sup>,弹性力学的变分原理可以应用于黏弹性材料,而且弹性力学的各类单元的有限元方程式

收稿日期:2013-06-13;修回日期:2013-10-06

基金项目:河北省科技计划项目(12217636)

作者简介:曹毅,博士研究生,研究方向为结构工程,电子邮件:coflaau@163.com

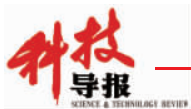


表 1 沥青罩面层材料参数

Table 1 Parameters of the asphalt overlay

材料	厚度/cm	材料性质
改性沥青 SMA13	4.0	黏弹性
改性沥青 Sup20	6.0	黏弹性
普通沥青 Sup25	8.0	黏弹性

均适用于黏弹性的有限元方程式,所以黏弹性本构矩阵可由弹性本构矩阵直接转换<sup>[2-4]</sup>。因此,可构建黏弹性材料的本构关系<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_{ij}[\xi] = \int_0^{\xi} D^*(\xi-\tau) \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial \tau} d\tau \quad (i,j,k,l=0,1,2,3,\dots) \quad (1)$$

其中,  $\sigma_{ij}$  为应力值;  $\varepsilon_{kl}$  为应变值;  $D^*$  为黏弹性材料的松弛模量;  $\tau$  为积分变量;  $\xi$  为黏弹性缩减时间。

因为沥青混合物属于热流变简单材料,故荷载物理时间  $t$  与黏弹性缩减时间  $\xi$  的关系为<sup>[6]</sup>

$$\xi = \int_0^t \frac{dt}{d\alpha_T} \quad (T=0,1,2,3,\dots) \quad (2)$$

式中,  $\alpha_T$  为时间-温度变化因子。

由式(1)可知,松弛模量是黏弹性材料的基本力学参数,因此求解沥青罩面层的黏弹性力学响应,首先要确定其松弛模量<sup>[7,8]</sup>。利用沥青混合料的松弛模量与复数模量含有相同黏弹性信息的特性,将其相互转化,可以解决不能直接得到松弛模量这一难题。

按照表 1 的沥青罩面层材料参数,选用沥青玛蹄脂碎石混合物 SMA-13(Stone Mastic Asphalt-13)、高性能沥青混合物 Superpave-20 和 Superpave-25 作为黏弹性试验材料,在室内进行复数模量试验<sup>[8,9]</sup>。

沥青罩面层复数模量与动态模量的表达式为

$$E^* = E' + E'' \quad (3)$$

式中,  $E^*$  为动态模量;  $E'$  为存储复数模量;  $E''$  为损失复数模量<sup>[9]</sup>。

沥青罩面层的复数模量试验根据 AASHTO TP-62 (美国国家公路与运输协会标准)进行。通过在稳定状态下的应力、应变幅值的比值,可以确定动态模量<sup>[10]</sup>,即

$$|E^*| = \frac{\sigma_{amp}}{\varepsilon_{amp}} \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{amp}$  和  $\varepsilon_{amp}$  分别为应力、应变的幅值。

相位角可由下式确定,即

$$\varphi = 2\pi f \Delta t \quad (5)$$

式中,  $f$  为荷载频率;  $\Delta t$  为试验中应力领先于应变的时间。

复数模量可由式(6)确定的存储模量  $E'$  和损失模量  $E''$  求得,即

$$E' = |E^*| \cos\varphi \quad E'' = |E^*| \sin\varphi \quad (6)$$

根据上述原理,以工程实践中应用较广泛的 Superpave25 (普通沥青) 为例,运用软件进行动态模量试验与相位角试验,结果如图 1、图 2 所示。

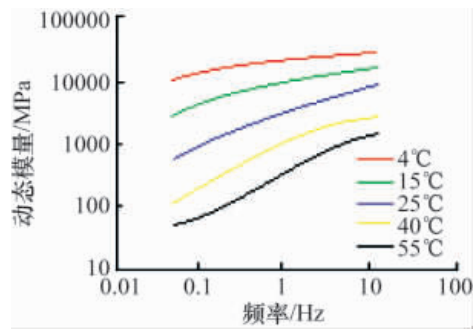


图 1 Superpave25 动态模量试验结果

Fig. 1 Dynamic modulus test results of Superpave25

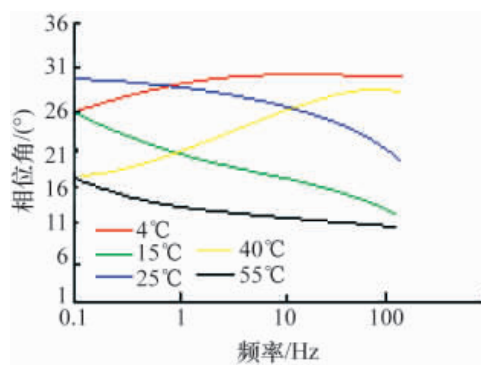


图 2 Superpave25 相位角试验结果

Fig. 2 Phase angle test results of Superpave25

沥青混合物可用 Prony 系列表达式或 Kelvin 模型进行描述<sup>[11]</sup>。沥青混合物的 Prony 系列表达式为<sup>[11]</sup>

$$D(t) = D_0 + \sum_{m=1}^M D_m [1 - \exp(-t/\tau_m)] \quad (7)$$

式中,  $D_0$  为初始松弛变量;  $D_m$  为在延迟时间  $\tau_m$  时的松弛变量。

由复数模量转换为松弛模量的理论关系式为<sup>[11]</sup>

$$D^* = \frac{1}{E^*} \quad (8)$$

式中,  $E^*$  为复数模量;  $D^*$  为松弛模量。

存储松弛模量  $D'$  为松弛模量  $D^*$  的实部,可由下式解得<sup>[11]</sup>,即

$$D' = \frac{E'}{(E')^2 + (E'')^2} \quad \text{或} \quad D' = \frac{\cos\varphi}{|E^*|} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可以导出<sup>[11]</sup>

$$D'(\varphi_m) = D_0 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{\varphi_m^2 \tau_m^2 + 1} D_m \quad (m=1,2,3,\dots) \quad (10)$$

式中,  $\varphi_m$  为在延迟时间  $\tau_m$  时的相位角。

根据沥青混合物的动态模量和相位角试验结果(图 1、图 2),利用式(6)和式(9)可求得沥青混合物的存储模量。利用式(10)可求得沥青罩面层沥青混合物松弛模量的 Prony 系列表达式系数(表 2)。

表 2 沥青罩面层混合料松弛模量 Prony 系列表达式系数  
Table 2 Coefficient of prony series expression of overlay asphalt mixture relaxation modulus

项数	延迟时间 $\tau_n/s$	SMA13	Sup20	Sup25
		松弛变量 $D_{n13}/MPa$	松弛变量 $D_{n20}/MPa$	松弛变量 $D_{n25}/MPa$
1	$1.0 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-7}$	$7.1 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-7}$
2	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$1.6 \times 10^{-6}$
3	$1.0 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-6}$
4	$1.0 \times 10^{-5}$	$6.9 \times 10^{-6}$	$6.1 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-6}$
5	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$
6	$1.0 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$
7	$1.0 \times 10^{-2}$	$8.2 \times 10^{-5}$	$5.9 \times 10^{-5}$	$5.9 \times 10^{-5}$
8	$1.0 \times 10^{-1}$	$2.4 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-4}$
9	$1.0 \times 10^0$	$7.6 \times 10^{-4}$	$4.3 \times 10^{-4}$	$5.9 \times 10^{-4}$
10	$1.0 \times 10$	$2.1 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$
11	$1.0 \times 10^2$	$4.1 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$7.7 \times 10^{-3}$
12	$1.0 \times 10^3$	$4.9 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-2}$
13	$1.0 \times 10^4$	$4.0 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-2}$
14	$1.0 \times 10^5$	$2.7 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-2}$
15	$1.0 \times 10^6$	$1.5 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-2}$
16	$1.0 \times 10^7$	$8.6 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-2}$
17	$1.0 \times 10^8$	$4.5 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$	$9.9 \times 10^{-3}$
$D_0$	—	$5.1 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$4.9 \times 10^{-5}$

## 2 沥青罩面层的黏弹性力学响应

沥青罩面层的黏弹性力学响应主要体现在沥青罩面层的应力变化情况<sup>[2]</sup>。为了研究沥青罩面层的黏弹性力学响应,运用有限元软件 ABAQUS 开发相应的子程序,将动态模量、相位角的试验结果和松弛模量 Prony 系列表达式系数代入子程序,分别进行了单一行车荷载和循环行车荷载的模拟试验。模拟单一行车荷载采用矩形荷载,模拟循环行车荷载采用矩形循环荷载,荷载幅值为 0.7 MPa,加载时间为 0.1s,间歇时间为 0.9s。两种动态荷载试验的温度条件为 15℃、25℃和 35℃。

### 2.1 单一荷载下沥青罩面层的应力变化

单一荷载作用时,沥青罩面层的应力变化情况如图 3、图 4 和图 5 所示,其中水平拉应力用正值表示,水平压应力用负值表示。

单一荷载作用时,在荷载作用瞬间,沥青罩面层表面瞬时产生压应力,其底层瞬时产生拉应力;随着荷载作用时间的增加,沥青罩面层逐渐向下弯曲,由于沥青罩面层的黏弹性,应力响应逐渐被削弱。在卸载时,已向下弯曲的沥青罩面层出现向上恢复原状的趋势,由于沥青罩面层的黏弹性,沥青罩面层不能迅速地恢复原状,而是需要一个过程,沥青罩面层恢复原状过程中其表面产生拉应力,底层产生压应力,并且在卸载过程中拉应力和压应力逐渐减弱。

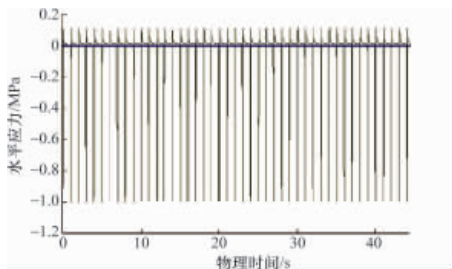


图 3 矩形荷载下沥青罩面层应力变化 (15℃)

Fig. 3 Response stress under horizontal rectangular load (15 °C)

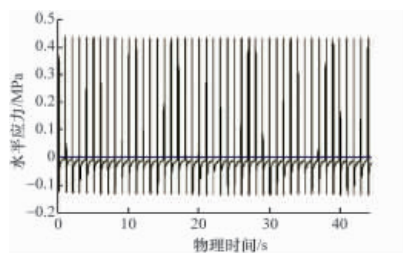


图 4 矩形荷载下沥青罩面层应力变化 (25℃)

Fig. 4 Response of stress under horizontal rectangular load (25 °C)

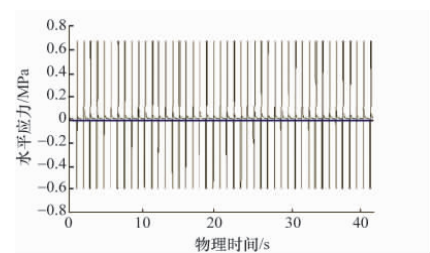


图 5 矩形荷载下沥青罩面层应力变化 (35℃)

Fig. 5 Response of stress under horizontal rectangular load (35 °C)

### 2.2 循环荷载下沥青罩面层的应力变化

循环荷载作用时,沥青罩面层的应力变化情况如图 6、图

7 和图 8 所示,其中水平拉应力用正值表示,水平压应力用负值表示。

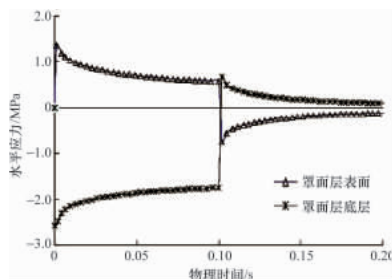


图 6 循环荷载下沥青罩面层的水平应力 (15℃)

Fig. 6 Surface level stress of asphalt overlay (15°C)

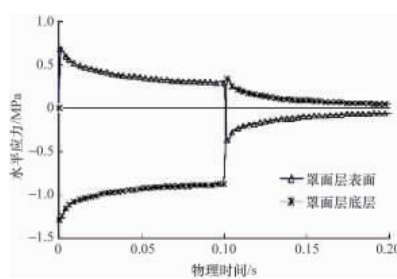


图 7 循环荷载下沥青罩面层的水平应力 (25℃)

Fig. 7 Surface level stress of asphalt overlay (25 °C)

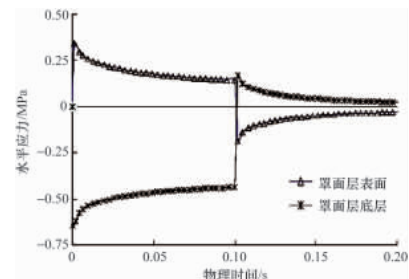


图 8 循环荷载下沥青罩面层的水平应力 (35℃)

Fig. 8 Surface level stress of asphalt overlay (35 °C)

在循环荷载作用下,沥青罩面层受水平压应力和拉应力的交替、重复作用,其表面和底层均产生少量的残余应力,残余应力起始累积较快,以后逐渐趋于稳定。表3给出不同温度下沥青罩面层残余应力幅值,当残余应力趋于稳定时,随温度的升高,沥青混合料的松弛模量增强,黏弹性减弱,沥青罩面层的残余应力也相应削弱减少<sup>[13,14]</sup>。

表3 不同温度下沥青罩面层的残余应力幅值

Table 3 Residual stress amplitude at different temperatures

温度/℃	沥青罩面层表面		沥青罩面层底层	
	压应力/MPa	拉应力/MPa	压应力/MPa	拉应力/MPa
15	1.302	0.112	0.707	0.132
25	0.986	0.075	0.425	0.116
35	0.728	0.064	0.162	0.084

在卸载过程中,25℃条件下的沥青罩面层应力幅值,小于15℃条件下的相应值且大于35℃条件下的相应值,该结果有助于合理确定室内试验的温度和相应荷载的大小。沥青罩面层拉应力和压应力幅值的比值在7%到12%的范围内,根据工程实践,比值在此范围,会增加路面结构从上到下疲劳开裂的风险。

### 3 结论

与以往研究中简单地把沥青罩面层看做弹性材料不同,本文基于黏弹性理论,通过动态模拟试验,研究了沥青罩面层的应力响应。由于沥青混合料具有黏弹性材料的特性,其某一时刻的应力响应不仅与该时刻的荷载状态有关,而且还与该时刻以前时间段的历史应力有关;当沥青罩面层处于循环荷载作用时,在其表面和底层会产生少量的残余应力,该残余应力会随着加载或卸载时间的延长,逐渐趋于稳定,并且随着温度升高会逐渐变小。可见把沥青罩面层作为黏弹性材料进行分析,所得结果更符合工程实际,能够更加准确、真实地反映沥青罩面层的力学行为,对于旧路改造的沥青罩面层优化设计具有实际参考意义。

### 参考文献 (References)

- [1] 张洪刚, 黄慧, 岳爱军. 不同结构类型的旧路改造升级沥青罩面结构的力学响应研究[J]. 公路工程, 2013, 38(1): 129-132.  
Zhang Honggang, Huang Hui, Yue Aijun. Highway Engineering, 2013, 38(1): 129-132.
- [2] 赵延庆, 谭忆秋, 王国忠, 等. 粘弹性对沥青路面疲劳开裂的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 3(1): 98-101.  
Zhao Yanqing, Tan Yiqiu, Wang Guozhong, et al. Jilin University Journal: Engineering and Technology Edition, 2010, 3(1): 98-101.
- [3] 赵延庆, 黄大喜, 潘友强. 柔性基层沥青路面结构粘弹性力学响应分析[J]. 土木工程学报, 2007, 21(1): 25-28.  
Zhao Yanqing, Huang Daxi, Pan Youqiang. Civil Engineering, 2007, 21(1): 25-28.

- [4] 赵延庆, 黄大喜. 沥青混合料破坏阶段的粘弹性行为[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 25-28.  
Zhao Yanqing, Huang Daxi. Chinese Highway Journal, 2008, 21(1): 25-28.
- [5] 赵延庆, 黄大喜, 潘有强. 利用虚应变分析沥青混合料的粘弹性[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 11(1): 34-38.  
Zhao Yanqing, Huang Daxi, Pan Youqiang. Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2008, 11(1): 34-38.
- [6] 黄希明. 沥青罩面工程施工技术[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2011, 7(7): 47-49.  
Huang Ximing. Highway and Transportation Research: Application Technology Edition, 2011, 7(7): 47-49.
- [7] Roque R, Birgisson B, Drakos C. Development and field evaluation of Energy-based criteria for top-down cracking performance of hot mix asphalt [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2004, 73(12): 229-260.
- [8] Qiang X, Lei L, Ying Z. Dynamic behavior of asphalt pavement structure under temperature-stress coupled loading[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53 (1): 1-7.
- [9] Zoa A, Fatima A, Christophe P, et al. Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43(11): 443-452.
- [10] Han G, Cristian S, Hussain U. Effects of high modulus asphalt binders on performance of typical asphalt pavement structures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(21): 207-213.
- [11] Elena R, Antonio M. Characterization of reinforced asphalt pavement cracking behavior using flexural analysis [J]. Social and Behavioral Sciences, 2012, 53(1): 356-365.
- [12] Suo L, Wang X. Analysis of load stress for asphalt pavement of lean concrete base[J]. Physics Proceeding, 2012, 24(3): 404-411.
- [13] Jiang M Y, Bor W T, Xiao Z, et al. Development of asphalt pavement fatigue cracking prediction model based on loading mode transfer function[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(3): 501-517.
- [14] Wang J, Birgisson B, Roque R. Effects of viscoelastic stress redistribution on the cracking performance of asphalt pavement [J]. Journal of the Association of asphalt Paving Technologists, 2006, 75(12): 637-675.

(责任编辑 韩星明)

### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。