

# 沥青路面剪切变形预估模型

王 翼,朱靓雯,孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:** 将考虑温度影响的材料参数引入对路面剪切变形的机理和特征分析,利用轮辙试验和环道试验数据建立沥青路面剪切变形预估方程,并通过实地调查数据对该模型进行标定和验证.结果表明:同一深度上取多点最大剪应力的平均值作为该深度剪应力分析值可较为准确地反映沥青层的受剪状况;通过分析、拟合试验数据获得的包含剪应力分析值与抗剪强度之比、温度、速度和加载次数等参数的剪切变形预估方程形式合理,具有较为可靠的拟合和预估结果.

**关键词:** 沥青路面;剪切变形;预估模型

**中图分类号:** U416

**文献标志码:** A

## Prediction Model of Shear Deformation of Asphalt Mixture Pavement

WANG Yi, ZHU Jingwen, SUN Lijun

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

**Abstract:** Dynamic modulus corresponding to effective temperature of permanent deformation was introduced to the calculation of the maximum shear stress and strain in the pavement. The shear deformation prediction model was developed by using the data of wheel rutting test and circular track test. The model was calibrated and verified by the field investigation data as well. The results indicate that the average maximum shear stress of three points at the same depth reflects the change of maximum shear stress in depth better. The shear deformation prediction model has the reasonable form, relatively reliable fitting and prediction results, involving maximum shear stress to shear strength ratio, temperature, loading speed and number.

**Key words:** asphalt pavement; shear deformation; prediction model

要原因之一,反映了路面结构中沥青层的抗变形能力不足<sup>[1-3]</sup>,对行车安全和路面寿命存在显著的不利影响.选用合理的指标和方法正确地反映和预测路面结构的剪切变形,有助于实现路面结构设计和材料设计的统一,从而保证沥青路面使用寿命和质量.

以往关于路面剪切变形的预估主要由三个方面内容组成.第一个方面是分析剪切变形机理,选取应力或应变参数.这其中又涉及两方面的问题:①材料模量参数的确定.美国应用研究协会(Applied Research Associates)提出动态模量之前,回弹模量为基于线弹性假设而普遍采用的材料模量指标.与回弹模量相比,动态模量更加有效地反映了温度与荷载作用频率对材料特性的影响<sup>[4]</sup>.②用于建立预估模型的应力、应变关键参数的取值方法.Monismith等<sup>[3]</sup>通过足尺加载试验发现,沥青层5~10 cm深度范围为剪切变形的易发位置,因此取双轮荷载外侧轮缘下方5 cm左右深处的最大剪应力作为剪切变形预估方程的主要参数.该研究以均一回弹模量值计算沥青层内临界位置的最大剪应力,没有考虑温度梯度的影响.但是Drakos等<sup>[5]</sup>采用相同的模量取值方法,通过理论计算分析得出剪切变形的易发位置为路面2~3 cm深度范围内.以上理论计算与实际观测结果相矛盾,表明在路面结构应力、应变计算中可能需要考虑温度对材料模量的影响,并重新验证文献[3]提出的应力、应变关键参数的取值方法是否合理.

第二个方面是模拟材料剪切变形的试验方法研究.目前评价沥青混凝土抗剪性能主要通过三轴剪切试验、简单剪切试验以及间接拉伸试验等获得<sup>[6-7]</sup>.由于围压的单一性,以上试验仅可模拟路面中某一点的应力、应变情况.为了解决这个问题,较好地模拟实际路面剪切变形产生过程中材料所受的

剪切变形是导致路面产生永久变形或车辙的主

收稿日期: 2012-08-31

基金项目: 江西省交通厅科技项目(2009c0001)

第一作者: 王 翼(1986—),男,博士生,主要研究方向与路面结构与材料. E-mail: mitchelwang@hotmail.com

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

围压和最大剪应力分布,孙立军<sup>[8]</sup>提出了单轴贯入试验,可合理评价沥青混凝土的抗剪切破坏性能.同时,轮辙试验与环道加速加载试验已被广泛用于评价沥青混凝土和特定路面结构的抗剪切变形能力.

第三个方面是剪切变形预估方程的参数和形式研究.力学-经验法路面设计指南(MEPDG)以温度与加载次数为变量提出了基于分层总和法的各亚层回弹应变与永久变形的换算方法<sup>[6]</sup>,实质上是基于压应变而非剪切变形机理,试验研究证明其预估结果存在较大误差<sup>[9-10]</sup>.Power law 和 Hoerl 模型的指数方程形式可以有效拟合混合料混凝土的剪切变形<sup>[3, 11]</sup>,但是模型参数受材料类型和制备条件的影响较大<sup>[11]</sup>,沥青路面剪切变形预估方程需做进一步研究和改进.

本文首先以考虑温度影响的动态模量和单轴贯入抗剪强度为主要材料参数,根据轮辙试验和环道加速加载试验数据提出了沥青混合料剪切变形预估模型的推导过程.然后,根据实地勘察获得的数据对该模型进行了标定和验证,获得了形式合理、结果可靠的沥青路面剪切变形预估模型.

## 1 材料参数与试验方法

### 1.1 材料参数

由于沥青胶结料的黏弹性质对温度较为敏感,沥青混凝土的动态模量受温度影响显著.考虑到实际路面温度场在时间轴上时刻处于动态变化之中,

$$\lg E^* = -0.349 + 0.754 |G^*|^{-0.0052} \left[ 6.65 - 0.032 \eta_{0.075} + 0.002 7 \eta_{0.075}^2 + 0.011 \rho_{4.75} - 0.000 1 \rho_{4.75}^2 + 0.006 \rho_{9.5} - 0.000 14 \rho_{9.5}^2 - 0.08 v - 1.06 \left( \frac{g}{v+g} \right) \right] + \frac{2.56 + 0.03 v + 0.71 \left( \frac{g}{v+g} \right) + 0.012 \rho_{9.5} - 0.000 1 \rho_{9.5}^2 - 0.01 \rho_{19}}{1 + e^{-0.781 4 - 0.578 5 \lg |G^*| + 0.883 4 \lg \delta}} \quad (3)$$

式中: $E^*$ 为动态模量,1/145 MPa; $\eta_{0.075}$ 为0.075 mm 筛孔通过率,%; $\rho_{4.75}$ 为4.75 mm 筛孔分计筛余,%; $\rho_{9.5}$ 为9.5 mm 筛孔分计筛余,%; $\rho_{19}$ 为19 mm 筛孔分计筛余,%; $v$ 为空隙率,%; $g$ 为有效沥青含量,%; $|G^*|$ 为沥青复数剪切模量,1/145 MPa; $\delta$ 为与 $|G^*|$ 对应的相位角,(°).

### 1.2 试验方法

目前用于综合评价沥青混凝土抗变形能力的试验方法主要有轮辙试验与加速加载试验.前者相对简单、易于操作,但数据离散性较大,需进行大量平行试验;后者代价较高,所获数据数量有限,但由于

对于路面剪切变形预估来说取其“等效”状况即可,因此取永久变形等效温度下沥青混凝土的动态模量作为材料模量参数.

NCHRP 9-22 根据实际路面永久变形与环境因素的对应关系提出了改进的永久变形等效温度计算公式如式(1)所示.永久变形等效温度取值范围为20~60℃<sup>[12]</sup>.

$$T_b = -32.532 - 6.050 \ln f - 7.753 z + 1.121 t + 1.718 \sigma - 0.482 w + 0.599 s + 0.057 r \quad (1)$$

式中: $T_b$ 为沥青路面某一深度处的温度,℃; $f$ 为荷载作用频率,Hz; $z$ 为预估深度,cm; $t$ 为年平均气温,℃; $\sigma$ 为月平均气温的标准差,℃; $w$ 为年平均风速,km·h<sup>-1</sup>; $s$ 为年平均晴天率,%; $r$ 为年降雨量,cm.

加速加载试验中采用人工干预的路面结构温度,可按多项式形式建立试验路面温度场预估模型<sup>[8]</sup>.

$$T_b = b_1 + b_2 z + b_3 z^2 + b_4 z^3 \quad (2)$$

式中: $b_1 \sim b_4$ 为待定回归系数.

实际路面当中的沥青混凝土的动态模量可根据式(1)求得的沥青层各亚层等效温度进行实测,或通过改进后的 Witczak 模型进行估算<sup>[13]</sup>,如式(3)所示.本文中试验及现场调查数据均通过长期积累获得,缺乏相应的动态模量试验数据.因此,材料动态模量均采用式(3)预估得到.式(3)通过沥青动态剪切流变试验中不同试验温度和加载频率对复数剪切模量和相位角的影响,来反映两者对材料模量的影响.

采用全尺寸路面结构,数据代表性较强.综上所述,选择轮辙试验与环道加速加载试验两种试验的实测数据作为预估方程的拟合样本.

不改变胶轮荷载的行走速度和频率,对标准轮辙试验仪的部分零部件进行了一定的改装与扩充.轮辙试验仪采用的标准试件尺寸为300 mm×300 mm×50 mm.为了反映不同结构参数对材料变形的影响,通过自行制作另外两种尺寸的试件导模成型300 mm×300 mm×40 mm和300 mm×300 mm×60 mm的试件进行轮辙试验.轮辙试验的标准轮压为0.7 MPa,通过调整配重块可进行0.5和1.2 MPa两种轮压的轮辙试验.轮载的作用频率为等间

隔 42 次 · min<sup>-1</sup>, 试验时长为 1 h.

环道试验数据取自重庆交通科学研究院. 环形试槽宽 3.5 m、深 2 m, 中心线周长 33 m, 参考目前各省常用路面结构形式在其中等长铺设三个全尺寸路面结构 A~C. 110 kN 单轴双轮荷载, 轮胎接地压

强 0.7 MPa, 运行速度 37.5 km · h<sup>-1</sup>, 试验时轮迹固定, 不作横向移动, 采用自动温控系统将路表面温度控制在 60 °C 左右. 路面结构如图 1 所示. 观测沥青层内变形和温度场的位移传感器和温度传感器分别埋设在各材料层的顶部和中部.

4 cm SMA13 改性沥青, 玄武岩	5 cm SMA13 改性沥青, 玄武岩	4 cm SMA13 改性沥青, 玄武岩
8 cm SUP20 改性沥青, 石灰岩	8 cm SUP20 改性沥青, 石灰岩	8 cm SUP20 改性沥青, 石灰岩
8 cm SUP25 普通沥青, 石灰岩	8 cm SUP20 改性沥青, 石灰岩	7.5 cm SUP25 普通沥青, 石灰岩
10 cm LSM25 普通沥青, 石灰岩	8 cm SUP25 普通沥青, 石灰岩	7.5 cm SUP25 普通沥青, 石灰岩
10 cm LSM25 普通沥青, 石灰岩	8 cm SUP25 普通沥青, 石灰岩	
20 cm 水泥稳定碎石, 水泥掺量5%	22 cm 级配碎石, 石灰岩	36 cm 水泥稳定碎石, 水泥掺量5%

a 结构 A

b 结构 B

c 结构 C

图 1 环道试验结构

Fig.1 Pavement structures used in circular track test

轮胎试验与环道试验中各层沥青混凝土的抗剪强度均通过单轴贯入试验测得, 即保持空隙率与油石质量比与混合料配合比相同, 旋转压实成型直径 100 mm、高 100 mm 圆柱形试件, 于 60 °C 烘箱中保温 5 h 后采用 28.5 mm 钢压头以 1 mm · min<sup>-1</sup> 的速度贯入. 对于公称最大粒径大于 16 mm 的沥青混凝土, 试件尺寸改为直径 150 mm、高 100 mm, 并且改用 42 mm 压头进行贯入试验. 抗剪强度计算公式为<sup>[8, 14]</sup>

$$\tau_0 = k k_h \frac{F}{A}$$

式中:  $\tau_0$  为抗剪强度, MPa;  $F$  为施加荷载极限值, kN;  $A$  为钢压头横截面面积, m<sup>2</sup>;  $k$  为剪应力系数;  $k_h$  为试件高度系数.

对于最大公称粒径小于等于 16 mm 的混合料,  $k = -0.0018h + 0.357$ ,  $k_h = 0.0416h + 0.5834$ ; 对于最大公称粒径大于 16 mm 的混合料,  $k = 0.35$  ( $h > 6$  cm),  $k = -0.0127h + 0.427$  ( $h = 4 \sim 6$  cm);  $k_h = 0.0762h + 0.238$  ( $h > 6$  cm),  $k_h = 0.047h + 0.3931$  ( $h = 4 \sim 6$  cm). 其中  $h$  为试件高度, cm.

### 1.3 技术路线

本文技术路线如图 2 所示.

## 2 剪应力取值方法的改进

### 2.1 剪应力分析模型

车辆荷载及其对路面作用力的分布形式一般被简化为圆形均布荷载, 而实际上车辆荷载对路面结构的作用是比较复杂的, 接地荷载并非均布荷载, 且

轮胎与路面的接触面也不是圆形, 相反, 它更大程度上接近矩形, 并且随着荷载的增大越来越接近矩形<sup>[16]</sup>. 首先建立有限元模型, 采用双矩形荷载, 荷载作用面积与双圆荷载面积相当, 中心距为 0.320 m. 在两种形状的荷载作用区域宽度方向上, 沿对称轴线等距各选取九个计算位点, 如图 3 所示.

有限元模型的合理性判断以该模型与 BISAR 程序计算结果的相吻合度作为标准. 由于 BISAR 程序至多仅能计算 10 层结构, 不能沿深度方向按 1 cm 为单位给定计算参数. 因此, 选取不考虑温度影响的结构参数组合用于有限元模型与 BISAR 的对比验算. 参考《公路沥青路面设计规范》<sup>[16]</sup> 当中关于新建沥青路面结构层厚度的计算示例, 确定半刚性、半柔半刚和柔性共三个代表结构(结构一~三)及其计算参数, 如表 1 所示.

表 1 用于有限元模型验算的路面结构参数

Tab.1 Pavement structure parameters used for finite element model verification

结构层材料	20°C 回弹模量/MPa	厚度/cm			泊松比
		结构一	结构二	结构三	
细粒式沥青砼	1 991	4	4	4	0.35
中粒式沥青砼	1 425	6	8	8	0.35
粗粒式沥青砼	978	8	15	20	0.35
水泥稳定碎石	3 188	38	—	—	0.20
水泥稳定砂砾	2 617	—	20	—	0.20
级配碎石	350	—	—	35	0.40
级配砂砾	250	—	18	—	0.40
水泥石灰砂砾土	1 591	17	—	—	0.40
土基	40	—	—	—	0.40

沿图 3 中各计算位点的深度方向每 1 cm 取一

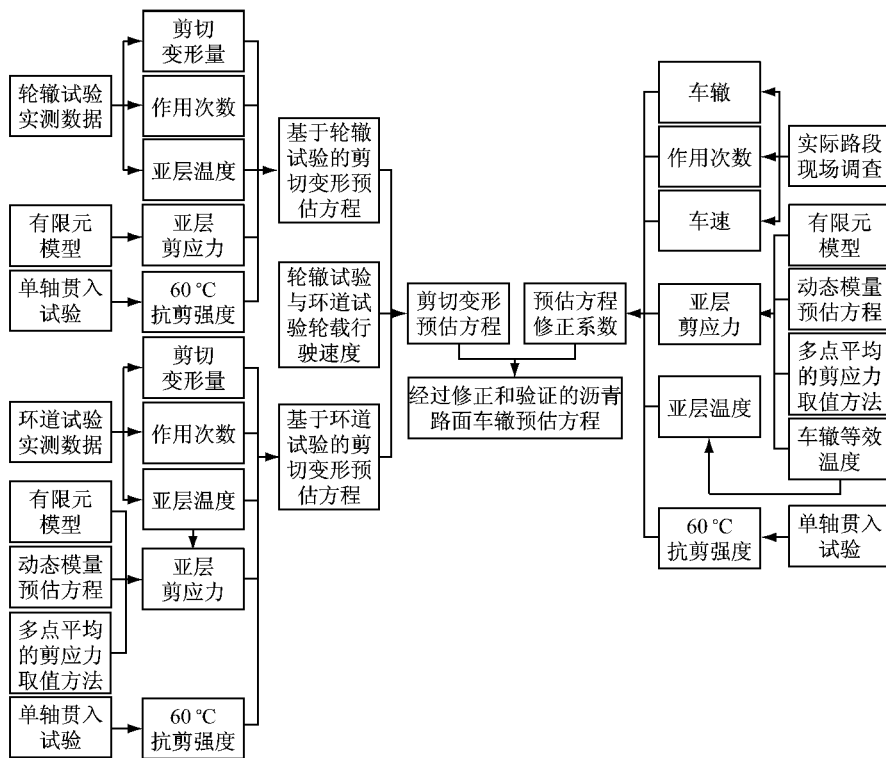


图 2 技术路线

Fig.2 Technical route

个最大剪应力值. 对比各深度处有限元模型与 BISAR 程序的最大剪应力求解结果如图 4. 计算结果的对比证明了该有限元模型设计合理、结果可靠.

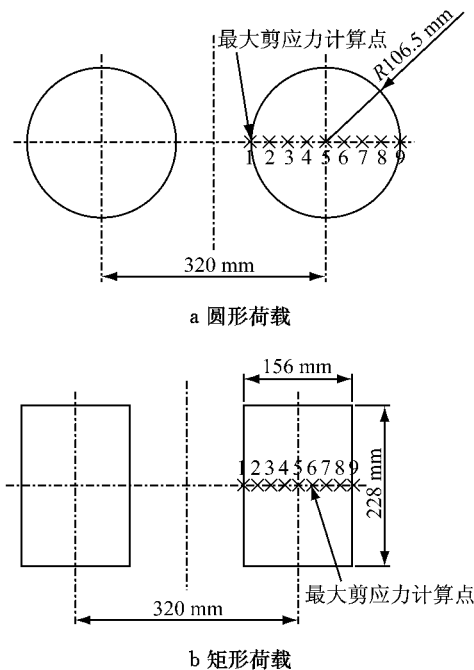


图 3 最大剪应力计算位点的选取

Fig.3 Calculation point of maximum shear stress

2.2 计算参数

通过动态剪切流变试验测得 10 Hz 作用频率下

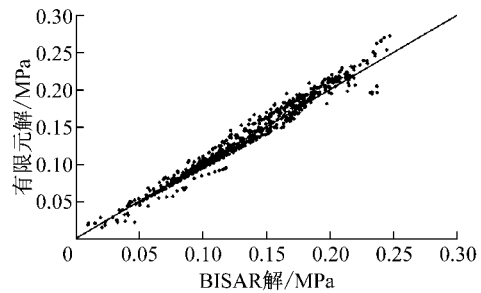


图 4 两种求解方法结果比较

Fig.4 Result comparison by two different calculation methods

壳牌 70 号与 SBS 改性沥青复数剪切模量、相位角如图 5. 从较为不利的温湿状况考虑,假设表 1 中所示的典型半刚性路面结构位于广州地区. 根据该地区的气候统计数据,由式(1)确定永久变形等效温度,由式(2)确定各亚层对应的动态模量如表 2.

表 2 用于剪应力计算的路面结构参数

Tab.2 Pavement structure parameters used for shear stress calculation

结构层材料	厚度/cm	$T_b/^\circ\text{C}$	$E^*/\text{MPa}$	泊松比
改性 AC-13C	4	51.7~44.5	941~1 413	0.35
普通 AC-20C	6	42.1~30.1	647~1 963	0.35
普通 AC-25F	8	27.7~20.0	1 897~5 128	0.35
水泥稳定碎石	38	—	11 000	0.20
水泥石灰砂砾土	17	—	200	0.40
土基	—	—	40	0.40

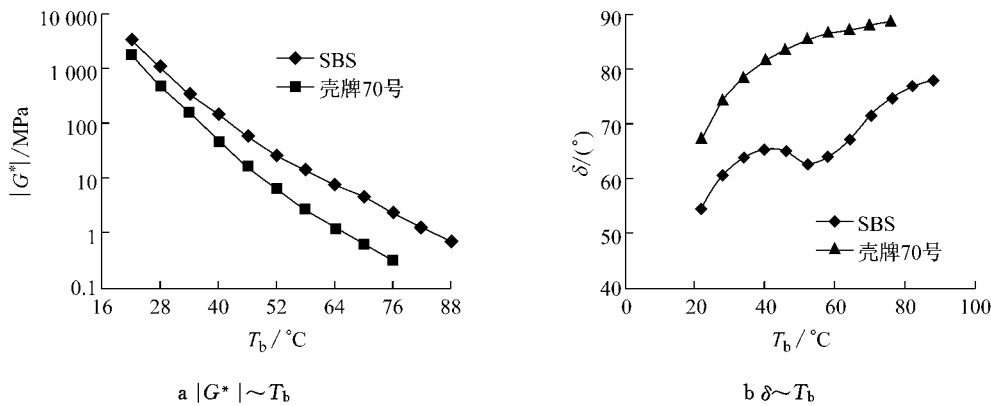


图 5 动态剪切流变试验结果

Fig.5 Results of dynamic shear rheology test

2.3 多点平均的取值方法

按表 2 所示结构及其参数,建立相应的有限元模型. 沥青层以 1 cm 为亚层厚度,按照与温度的对应关系分别选取计算参数,图 3 中九个取值位点沿深度的最大剪应力与剪应变分布如图 6 所示.

从图 6a 可以看出,轮载边缘下方 2 cm 深处的最大剪应力为极大值,但仅存在于面积较小的局部区域;而 4~6 cm 深度位置的剪应力“次高”的“驼峰”区域影响范围较大. 对比图 6b 可知,4~7 cm 深度范围内的剪应变明显高于其他位置.

以上说明,首先若以最大剪应力作为剪切变形的分析指标,参考文献[3]取轮载边缘位置作为取值位点将高估上面层的受力状况,同时低估了中面层的最大剪应力分布. 因此,通过大量计算比较,取图 3 中 5,7,9 三位点的均值,作为该深度的最大剪应力分析值较为准确. 其次,4~6 cm 深度范围内剪应变较大,是因为中面层温度较高,且材料的模量较低、抗变形能力较差导致. 仅从应力角度难以对沥青层各层位的变形分布做出判断,应当引入衡量沥青混凝土抗剪切变形的性能指标.

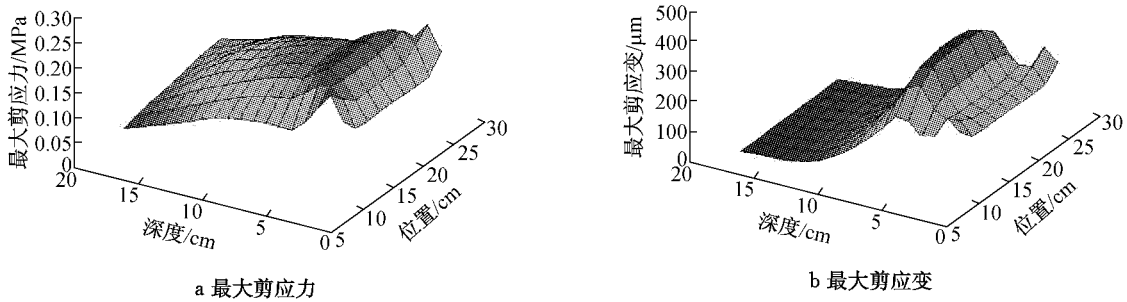


图 6 典型结构的最大剪应力和剪应变

Fig.6 Maximum shear stress and strain of typical structure

3 剪切变形预估方程的建立

3.1 轮辙试验分析

沥青混合料的抗剪强度通过 60 °C 单轴贯入试验测得. 轮辙试验中轮载的实测压强分别为 0.56, 0.72 和 1.10 MPa,各轮载压强下的荷载作用面积均较小,仅约为 8~10 cm<sup>2</sup>,剪应力分布特征简单,因而各亚层最大剪应力不再区别取值方法,均取该亚层极大值. 通过有限元分析发现,车辙试件的最大剪应力仅与轮载压强与试件厚度有关,与材料模量无关.

采用 AC-13 沥青混合料分别成型 4,5,6 cm 的

轮辙试验试件,并于 20,40 和 60 °C 温度下分别施加接触压强为 0.56,0.72 和 1.10 MPa 的轮载. 混合料基本体积与性能参数如表 3.

表 3 AC-13 沥青混合料的基本参数

Tab.3 Basic properties of AC-13 mixture

级配	≥4.75 mm 粗集料类型	沥青质量分数/%	v/ %	O/ %	g/ %	60 °C 抗剪强度/MPa
AC-13	玄武岩	4.3	4.0	13.9	71.2	1.063

注:O 为矿料间隙率.

沥青混合料变形可为压密变形、剪切变形和失稳变形三个阶段,Power law 模型可有效表征沥青混合料剪切变形量和加载次数的变化规律<sup>[11,17]</sup>. 轮辙

试验每 10 s 取一组加载次数-变形数据,利用试验中第 30~60 min 加载次数  $N$  与永久变形数据  $P_d$  的对数线性关系,拟合 Power law 模型中的回归系数。

$$\lg P_d = \lg a + b \lg N$$

式中的系数  $a$  和  $b$ ,以 10% 的偏差率从每组轮辙试验数据中识别并剔除压密变形阶段的数据,从而得到各组轮辙试验中的剪切变形数据。

考虑到材料抗剪强度的取值应与试验温度相互对应,但是永久变形等效温度随地区和深度的不同而不同,实现剪应力与抗剪强度在温度上的一一对应过于繁琐、可操作性不强。为了简便有效地弥补以上缺陷,尝试引入温度参数  $T_b$  作为修正参数,材料抗剪强度统一取 60 °C 下的单轴贯入试验实测值,得到基于轮辙试验的剪切变形预估方程(4)。

$$P_d = \sum_{i=1}^n \alpha T_{bi}^\lambda N^\beta \left(\frac{\tau_i}{\tau_{oi}}\right)^\gamma \quad (4)$$

式中: $P_d$  为剪切永久变形量,mm; $n$  为计算亚层数目; $T_{bi}$  为亚层  $i$  温度,°C; $\tau_i$  为亚层  $i$  剪应力,MPa; $\tau_{oi}$  为亚层  $i$  的抗剪强度,MPa; $\alpha, \lambda, \beta, \gamma$  为待定回归系数。

采用 27 种工况、共 81 组 AC-13 轮辙试验试件的剪切变形阶段数据,拟合得到式(4)中  $\alpha = 10^{-9.3890}, \beta = 1.1496, \gamma = 0.2502, \lambda = 3.9013$ 。相关系数  $R^2 = 0.9258$ ,拟合结果如图 7 所示。

轮辙试验结果和数据分析表明,剪应力与抗剪

强度之比可作为拟合沥青混凝土剪切阶段变形的主要指标;通过温度修正参数可简便有效地简化剪应力与抗剪强度的温度对应关系。

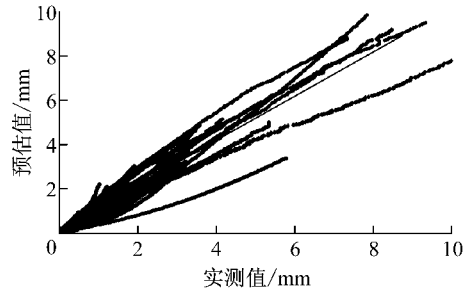


图 7 轮辙试验数据的拟合结果  
Fig.7 Fitting results of wheel rutting test data

### 3.2 环道试验分析

环道试验路面结构组合与材料抗剪强度见表 4。由于试验结构中温度传感器埋设数量有限,深度方向上不能达到每 1 cm 都可获得实测温度的精度。因此,通过拟合环道各结构内部的温度实测数据得到式(5),沥青层各亚层温度按式(5)确定。

$$T_b = 0.0028z^2 - 0.487z + 60 \quad (5)$$

各结构层材料的动态模量按式(3)确定,代入有限元模型计算三种结构中的最大剪应力,并按照第 2 节提出的多点平均的取值方法得到各亚层剪应力分析值。

表 4 环道加速加载试验路面结构参数

Tab.4 Pavement structures parameters of circular track test

结构层材料名称	$E^*/$ MPa	厚度/cm			泊松比	60°C抗剪强度/MPa		
		结构 A	结构 B	结构 C		结构 A	结构 B	结构 C
改性 SMA13	736~798	4	5	4	0.35	1.152	1.256	1.261
改性 SUP20	531~740	8	16	8	0.35	0.881	0.912	0.943
SUP25	314~412	8	16	15	0.35	0.812	0.797	0.732
LSM25	227~322	20	—	—	0.35	0.640	—	—
水泥稳定碎石	11 000	20	—	36	0.20	—	—	—
级配碎石	350	—	22	—	0.40	—	—	—
土基	40	—	—	—	0.40	—	—	—

观察三种结构的加载次数和变形量的关系发现,三种结构累计作用次数  $N$  和永久变形量  $P_d$  的关系基本符合 Power law 模型变形规律,分别为结构 A

$$\log P_d = -0.7291 + 0.3449 \log N, R^2 = 0.9835$$

结构 B

$$\log P_d = -0.4145 + 0.2834 \log N, R^2 = 0.9744$$

结构 C

$$\log P_d = -0.8929 + 0.3705 \log N, R^2 = 0.9718$$

因此,将三种结构中沥青层的永久变形近似作为剪切永久变形。

利用环道表面测得的各结构沥青层的总变形随加载次数的变化数据拟合式(4),得  $\alpha = 10^{-8.8710}, \beta = 0.3988, \gamma = 0.1877, \lambda = 4.0274$ 。相关系数  $R^2 = 0.9614$ ,拟合结果见图 8a。

环道各材料层的变形数据未参与上述建模,作为对比数据样本。各材料层的实测变形值与预估值的对比见图 8b,相关系数  $R^2 = 0.8237$ 。图 8b 中实测变形值较大、预估值偏小的点主要为 SUP25 和 LSM25 下面层或上基层顶部变形。造成预估结果产生明显偏差的原因可能是由于试槽内施工困难,造成下面层或上基层压实效果不佳,对该层沥青混凝

土的压密变形估计不足。

环道试验数据的拟合与分析表明,第 1 节中引用的沥青混凝土动态模量确定方法和第 2 节提出的最大剪应力的取值方法用于拟合沥青路面的剪切变形具有一定的合理性与可靠性,可在一定误差范围内准确预估沥青路面内部各材料层的变形情况。

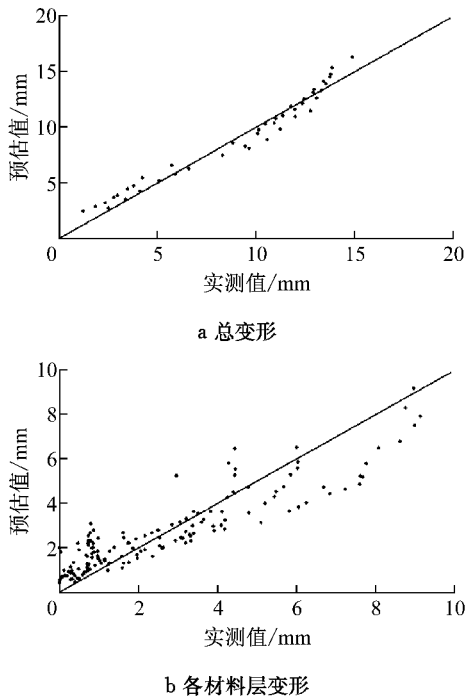


图 8 环道试验数据拟合与预估结果

Fig.8 Fitting and prediction results of circular track test

### 3.3 预估方程的拟合

预估方程的建立需要解决两个方面的问题.一是针对材料模量做进一步修正.不同的荷载作用频率和加载时间将对应不同的动态模量.二是对不同试验方法所得数据的整合.车辙与环道试验所得数据样本量不同、荷载作用特征也不同.针对以上两个问题,并根据目前的数据收集条件考虑引入综合速度修正系数.方程形式由式(4)进一步修正为式(6).

$$P_d = \sum_{i=1}^n \alpha T_{bi}^{\lambda} \left( \frac{N}{1 + \mu U^{\varphi}} \right)^{\beta \left( \frac{t_i}{t_{0i}} \right)^{\gamma}} \quad (6)$$

式中: $U$ 为轮载运行速度; $\mu, \varphi$ 为回归系数。

轮辙试验中胶轮运行速度约  $1.21 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,环道试验运行速度约为  $37.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .选用轮辙试验中 81 组 AC-13 剪切变形数据第 30 min 和第 45 min 的数据共 54 个,与环道试验中全部 45 个结构总变形数据点拟合,得  $\alpha = 10^{-8.4360}$ ,  $\beta = 0.6207$ ,  $\gamma = 0.4457$ ,  $\lambda = 4.2229$ ,  $\mu = 0.2053$ ,  $\varphi = 2.1359$ .相关系数  $R^2 = 0.9775$ ,拟合结果如图 9a.图 9b 为方程

(6)预估环道结构各材料层变形的结果。

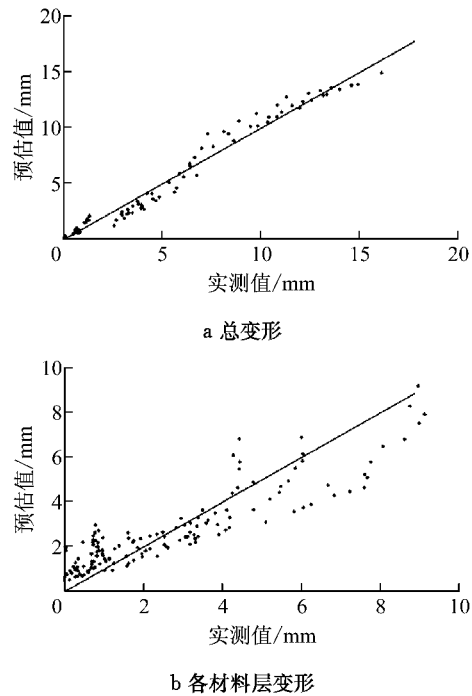


图 9 剪切变形预估方程拟合与预估结果

Fig.9 Fitting and prediction results of shear deformation prediction model

比较图 8b 与图 9b,新的方程形式对沥青路面内部各结构层的剪切变形预估结果无显著影响。

## 4 预估方程的标定与验证

实际路面中的车辙既包括压密变形和剪切变形,还包括变形位置两侧的隆起部分.而压密变形与路面施工质量密切相关,材料离析、压实度不足等使压密变形的大小在不同地区的高速公路之间具有一定的随机性.此外,环道试验观测发现,不同路面结构的隆起系数不尽相同.因此,式(6)的标定和验证数据取自同一条高速公路,以便尽可能消除由于压密变形和隆起系数的差异而产生的误差.同时,引入转换修正系数  $\kappa$  将式(6)标定为车辙预估方程

$$R_d = \kappa \sum_{i=1}^n \alpha T_{bi}^{\lambda} \left( \frac{N}{1 + \mu U^{\varphi}} \right)^{\beta \left( \frac{t_i}{t_{0i}} \right)^{\gamma}} \quad (7)$$

式中: $R_d$ 为车辙深度,mm。

GS 高速为华南地区的一条交通主干道,交通量大且地处亚热带地区,车辙较为明显.由于现场取芯、车辙和车速测量较为困难,数据量偏少,共选择 14 个断面(S1~S14)进行实地钻芯,并测得钻芯件所在断面的车辙深度和车速.轴重数据取自收费站

计重收费数据,换算为标准轴载累计作用次数.通过对 28 个钻芯件的切割与单轴贯入试验测得各结构层的材料抗剪强度.根据收集到的气候数据,利用式

(1)和(3)得到路面结构参数如表 5,通过有限元模型和多点平均的取值方法获得各亚层剪应力分析值.实地调查数据如表 6.

表 5 GS 高速路面结构参数

Tab.5 Structure parameters of GS highway

结构层材料名称	厚度/cm	$T_b/^\circ\text{C}$	$E^*/\text{MPa}$	60℃抗剪强度/MPa	泊松比
改性 SMA13	4	51.7~44.5	1 074~1 624	0.713~1.028	0.35
改性 AC-13C	4	42.1~34.9	1 649~2 798	0.858~1.242	0.35
普通 AC-20C	6	32.5~20.6	1 442~6 338	0.658~0.950	0.35
普通 AC-25F	6	20.0	5 128	0.651~1.031	0.35
水泥稳定碎石	36+20	—	11 000	—	0.20
土基	—	—	40	—	0.40

表 6 实地调查数据

Tab.6 Field investigation data

测点	累计标准轴次	车辙深度/mm	车速/(km·h <sup>-1</sup> )	测点	累计标准轴次	车辙深度/mm	车速/(km·h <sup>-1</sup> )
S1	44 894 840	8.5	44.8	S8	29 929 892	8.8	59.1
S2	44 894 840	25.0	40.2	S9	13 178 027	4.5	71.4
S3	44 894 840	6.8	54.8	S10	13 178 027	6.0	80.7
S4	44 894 840	11.7	30.3	S11	21 963 386	8.9	60.1
S5	44 894 840	10.7	75.6	S12	21 963 386	8.0	77.6
S6	44 894 840	8.2	57.2	S13	21 963 386	10.1	45.3
S7	29 929 892	6.6	53.2	S14	21 963 386	11.8	46.7

利用测点 S1~S7 的数据对式(7)作标定,得  $\kappa=1.0156$ ,相关系数  $R^2=0.7637$ ,如图 10a.由于实际路面车辙多为 10 mm 左右,辙槽两侧未出现较为明显的隆起,所以标定系数较接近于 1.验证数据相关

系数  $R^2=0.5196$ ,如图 10b.由于标定与验证的数据量偏小,和实验室相比影响实际路面出现车辙的荷载与环境因素更加复杂多变,方程的预估值与实测值的相关系数相比试验数据明显降低,需要更多的实地调查数据对车辙预估方程做进一步的标定和修正.

### 5 结论

(1) 考虑温度对沥青混凝土模量的影响有利于准确分析路面内部最大剪应力的分布和易产生剪切变形的最不利位置.同一深度上取多点平均的最大剪应力取值方法可较为准确地反映沥青层各深度的最大剪应力总体分布.

(2) 最大剪应力与材料抗剪强度的比值可作为拟合和预估沥青路面剪切变形的主要指标.温度修正系数简便、有效地解决了最大剪应力的计算温度与材料抗剪强度的试验温度之间的不对应关系.速度修正系数可将不同荷载运行速度下的试验数据有效整合.

(3) 通过分析、拟合试验数据获得的剪切变形预估方程形式合理,具有较为可靠的拟合和预估结果.由剪切变形预估方程转化的车辙预估方程仍需

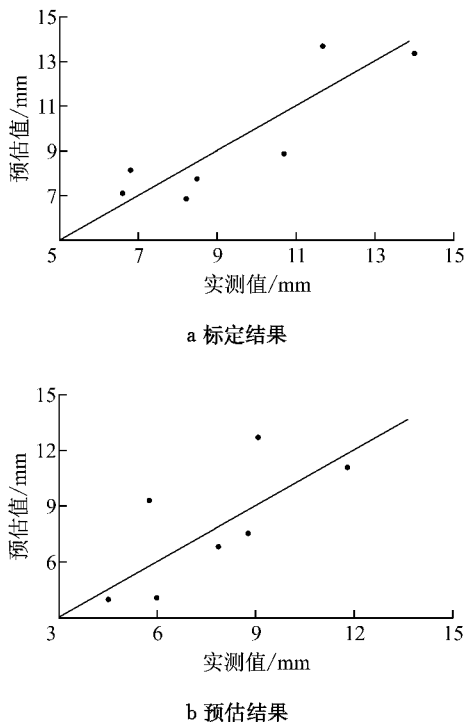


图 10 车辙预估方程的标定与预估结果

Fig.10 Calibration and prediction results of rutting prediction model



补充更多实地调查数据进行标定和验证。

### 参考文献:

- [1] Sousa J B, Craus J, Monismith C L. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete[R]. Washington D C: Strategic Highway Research Program, 1991.
- [2] Monismith C L, Hicks R G, Finn F N, et al. Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1994.
- [3] Monismith C L, Deacon J A, Harvey J T. Westrack; performance models for permanent deformation and fatigue [R]. Berkeley: University of California, 2000.
- [4] Applied Research Associates. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures 2002[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2004.
- [5] Drakos C, Roque R, Birgisson B. Effects of measured tire contact stresses on near-surface rutting[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1764: 59.
- [6] Cominsky R J, Huber G A, Kennedy T W, et al. The superpave mix design manual for new construction and overlays [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1994.
- [7] Kennedy T W, Huber G A, Harrigan E T, et al. Superior performing asphalt pavements (superpave): the product of the SHRP asphalt research program [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1994.
- [8] 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. Structural behavior study for asphalt pavements [M]. Beijing, China Communications Press, 2005.
- [9] Archilla A R, de Lannoy K L, Diaz L G. Using permanent deformation tests and the MEPDG to quantify permanent deformation improvements from modified binders[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2008, 77: 1005.
- [10] Li Q, Lee H, Lee S. Permanent deformation model based on shear properties of asphalt mixtures [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2210: 81.
- [11] Diaz L, Archilla A. Effect of laboratory data range selection in permanent deformation characterization of asphalt mixtures [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2057: 126.
- [12] El-Basyouny M, Jeong M. Effective temperature for analysis of permanent deformation and fatigue distress on asphalt mixtures[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2127: 155.
- [13] Bari J, Witczak M W. Development of a new revised version of the Witczak E\* predictive model for hot mix asphalt mixtures [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006, 75: 381.
- [14] 崔鹏. 长寿命沥青路面设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
CUI Peng. Research on perpetual pavement design method [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [15] 酒井秀男, 管建民. 关于橡胶以及轮胎的接触压力分布的测定和图像处理的研究[J]. 橡胶工业, 1995, 42(11): 682.  
Sakai Nobuo, Guan Jianmin. Image manipulation study end test of rubber tire contact pressure[J]. China Rubber Industry, 1995, 42(11): 682.
- [16] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway asphalt pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [17] 汤文. 沥青路面车辙预估模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.  
TANG Wen. Research on deformation evaluation model of rutting in asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.