

文章编号: 1002-0268 (2010) 08-0001-06

高温条件下上坡路段沥青路面结构性能研究

李雪连¹, 陈宇亮², 张起森¹

(1. 公路工程省部共建教育部重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410004;

2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 结合京珠高速公路某路段的现场路面温度实测结果, 运用三维有限元方法, 重点分析了不同道路纵坡、不同应力场情况下, 上坡路段路面结构在水平和竖向荷载综合作用时, 其最大拉应力、最大剪应力和最大路表弯沉的变化规律。分析结果表明, 道路纵坡改变只对面层所受应力有较大影响, 且只在距路表 2 cm 深度范围内存在拉应力; 高温温度场的存在虽然不会明显加大上坡路面结构各层的拉应力和剪应力, 但会使路表弯沉明显增大, 容易导致车辙破坏。对京珠高速公路某路段车辙病害展开现场调查, 调查发现该路段严重的车辙变形 60% 是由中面层产生, 其余 40% 是由上面层和下面层产生, 即车辙大多来源于中面层。最后, 提出了上坡路段沥青路面结构设计建议, 还据此进行面层混合料设计, 且铺筑了试验路。所设计的沥青路面车辙发展缓慢, 能适应炎热环境温度下长大纵坡的道路交通。

关键词: 道路工程; 沥青路面; 有限元方法; 上坡; 车辙

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

Study on Performance for Upslope Asphalt Pavement Structure at High Temperature

LI Xuelian¹, CHEN Yuliang², ZHANG Qisen¹

(1. Key Laboratory of Highway Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410004, China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: With the on-site measured pavement temperature from a selected section on Beijing-Zhuhai expressway, the variation regularities of maximum tensile stress, maximum shear stress and the maximum flexure of upslope pavement structure were presented by FEM under the composite effect of horizontal load and vertical load. It shows that (1) the degree of slope affects the stress of surface course more, and the tensile stress appears within the range of 2 cm deep from surface; (2) although the high temperature field does not make tensile stress and shear stress of upslope pavement increase, it makes the flexure of surface rise and easily result in rutting. The investigation on rutting failures on a section of Beijing-Zhuhai expressway was performed. It is found that 60% of serious rutting of the section is generated by asphalt middle course and the remaining 40% comes from the other surfaces, which means that middle course is the most important rutting position. Finally, some suggestion for the design of the upslope pavement structure was put forward and the mixture of the surface was designed and test road was built accordingly. The rutting develops slowly in the designed pavement, which could adapt to the long longitudinal gradient slope at high temperature.

Key words: road engineering; asphalt pavement; FEM; upslope; rut

0 引言

随着我国经济的快速发展, 公路的建设取得了很

大成就, 但我国的沥青路面也存在一定的问题, 如沥青路面的辙槽和推挤等早期破坏现象非常严重, 特别是在上坡路段。京福高速公路济南至泰安段通车 2 a

收稿日期: 2009-09-05

基金项目: 公路工程省部共建教育部重点实验室(长沙理工大学)开放基金资助项目(kj080103)

作者简介: 李雪连(1978-), 女, 福建德化人, 博士, 讲师, 从事路面(桥面铺装)结构力学分析和材料方面的研究。(lixuelianfj@yahoo.com.cn)

后,许多上坡段在较短的时间内出现严重的高温车辙变形,最大的车辙深度达5.3 cm。107国道河南驻马店走马岭改造路段,开放交通后不到1个月,就出现了严重的车辙,其中坡顶段最大车辙深度达9.5 cm。沈山高速公路通车2 a后,调查发现纵坡大于2%的路段车辙量和深度明显大于纵坡小于2%的路段,车辙深度要比普通路段大1~3倍。小车行驶在车辙上,不小心就会托住底盘,如果形成积水,汽车驶过车辙时则相当危险。也就是说,上坡路段是事故多发路段,在交通量大的地方形成了多处“死亡谷”。国内比较典型的长上坡路段如北京八达岭高速进京方向K55~K50路段、京珠粤北高速南行39~51 km处、漳州—龙岩高速公路和溪段(漳州方向)以及青海湟倒路等路段。在没有采取任何治理措施前,死亡率的算术平均值为 $(3.39 + 2.07 + 1.81)/3 = 2.42$ 人/(km·a)。

可见,对上坡路段沥青路面结构受力特性进行研究和探讨是很有必要的。考虑到沥青混合料是一种典型的感温性材料,其强度和抵抗变形能力随温度的升高而显著降低,抗压强度和抗弯刚度因温度变化而相差几倍到几十倍。因此,本文结合京珠高速公路广东韶关市甘塘至广州太和段的现场温度实测结果,探讨高温下上坡路段路面结构的力学特性,重点分析不同道路纵坡和不同应力场情况下,上坡路面结构在水平和竖向荷载综合作用时,各路面结构层最大拉应力、最大剪应力和最大路表弯沉的变化规律,并展开路面车辙调查,提出相关建议,据此进行了混合料设计和试验路修筑与观测,为这种特殊路段沥青路面结构设计提供参考。

1 计算模型与荷载条件

1.1 计算模型与原理

分析采用通用有限元计算程序,依据荷载应力及接地尺寸特性,分析范围为 x 、 z 轴方向各3 m, y 方向深度根据各主要指标值的变异性进行调整,上坡方向为 x 轴正向,如图1所示。计算采用8节点等参单元,网分时对加载位置及临近范围进行了局部细化。边界条件假设为底面上没有 y 方向位移,左右两侧没有 z 方向位移,前后两面没有 x 方向位移,面层表面作为自由面,不进行任何约束。采用有限元位移法的有关原理^[1],对其进行分析。

1.2 荷载条件

分析时以标准轴载BZZ-100单侧双轮荷载50 kN为额定荷载,轮胎接地面积由规范^[2]中的圆形荷载按

面积等效原则转换成正方形189 mm×189 mm,保持两轮中心间距320 mm不变,几何形状见图2。

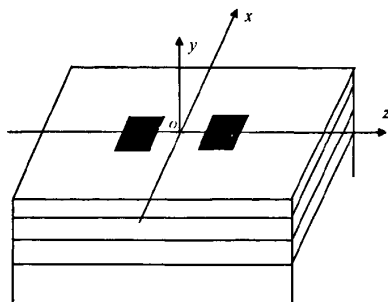


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Calculation model

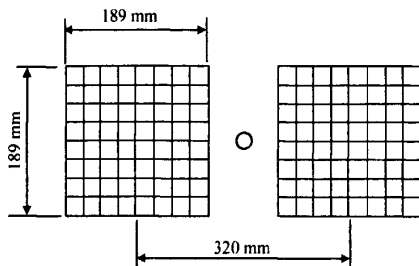


图2 轮胎接地面积简化示意图(O为坐标原点)

Fig. 2 Simplified representation of tyre grounding area

另外,假定轮载在作用面内均匀分布。由于车辆制动或启动加速时轮胎与地面的接触范围内会产生一定大小的水平力,为简化计算,假设轮胎与地面的摩擦系数相同,而且轮胎因制(启)动而产生的新变形对路面的垂直压力影响不计,则水平力的量值在轮胎作用面内也是均匀分布的。作者假设轮胎与路面的滑动摩擦系数为 f ,则在上坡过程中轮胎接触面受到滚动摩擦力 $F_{摩}$ (与行车反向)和重力 G (法向分力和切向分力)共同作用。将所受的力沿平行于路面和垂直于路面进行分解,得:

$$N = G \cos \alpha, F_{摩} = G \sin \alpha + Nf,$$

式中, G 为轮载重量; α 为斜坡倾角,则道路纵坡 $i = \tan \alpha$ 。

2 路面结构温度场分析

温度场计算参数采用京珠高速公路广东韶关市甘塘至广州太和段的现场温度实测结果。广韶高速公路沥青路面段全长超过150 km,根据目前路线途经区域的气温分布状况,在沿线选择3个温度测试点,进行从2006年8月1日到8月31日为期1个月的温度测试,测试点分别见图3。

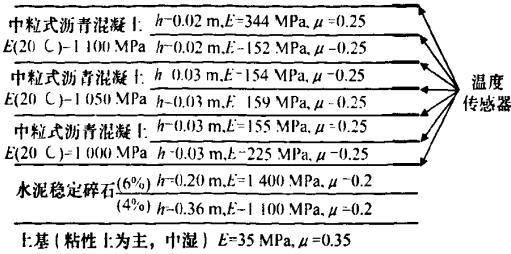


图 3 路面结构参数及温度传感器位置

Fig. 3 Parameters of pavement structure and the position of temperature sensor

从文献 [3] 可知, 下午 14:00 点左右路面温度达到最高。其中, 瓮城测点路面的最高温度见表 1, 发现沥青路面内部温度比表面温度还高, 这与文献 [4] 的 Superpave 结论一致。另外, 基层底和底基层层底温度参考文献 [5] 近似取 38 ℃ 和 32 ℃; 土基底和参考温度均取 20 ℃。

表 1 各层位最高温度
Tab. 1 Maximum temperature in each layer

层位	路表	路表下					
		2 cm	4 cm	7 cm	10 cm	13 cm	16 cm
最高温度/℃	49.8	70.7	69.2	68.5	67.9	58.3	55.7

沥青混合料的模量可以采用不同的方法进行测试, 不同的测试方法测得的模量是不同的。在工程实际中, 所用到的有抗压回弹模量、拉伸模量、弯拉模量、松弛模量以及蠕变模量等。其中, 在以弹性层状体系为理论基础的路面结构设计与分析中, 应用最多的是抗压回弹模量。国内外的研究表明: 沥青混合料是一种典型的热流变简单材料, 具有很强的温度敏感性, 因而在测定沥青混合料的抗压回弹模量时必须考虑温度的影响, 常用的测试方法是: 用马歇尔击实度计量圆柱型试件, 以一定的加载速度、在某一恒温环境中进行单轴压缩回弹试验测得。

根据文献 [6] 提供的沥青面层与温度的关系式 (6), 以及文献 [7] 瓮城段沥青路面各结构层 20 ℃ 时抗压回弹模量, 求得高温下各沥青层模量值, 同时, 认为水泥稳定碎石层和土基模量不随温度的改变发生变化, 各结构层具体取值见图 3。

$$K = \frac{E_s}{E} = 10^{0.016\ 93(T - T_s)}, \quad (6)$$

式中, K 为温度修整系数; T_s 为标准温度, 此处取 20 ℃; E_s 为 T_s 时对应的沥青层抗压回弹模量; E 为表面温度为 T 时对应的沥青层抗压回弹模量。

在进行高温温度应力计算时, 取参考温度为 20

℃, 路面结构在此温度基础上进行升温处理。路面材料及其温度参数取值见图 3 和表 2。

表 2 路面材料温度参数
Tab. 2 Temperature parameters of pavement material

材料类型	线胀系数/ ($\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]
沥青面层	2.0	1.16
6% 水泥稳定基层	1.0	1.40
4% 水泥稳定基层	1.5	1.28
土基	50.0	1.40

3 上坡路面力学特性影响因素分析

我国现行沥青路面设计规范 [2] 设计弯沉值为路面整体刚度的控制指标, 对高速、1 级公路、2 级公路的沥青混凝土面层和半刚性材料层、底基层拉应力是否满足容许拉应力的要求验算。从力学角度考虑, 路面损坏状态主要是: 路面结构层被拉裂、路面结构剪切破坏以及路面的过大变形。因此, 本文着重分析不同道路纵坡、不同应力场和不同超载情况下, 各结构层的最大拉应力、最大剪应力和最大路表弯沉 3 个指标的变化规律。

3.1 道路纵坡

为研究高温下道路纵坡对路面结构力学特性的影响, 分别计算在荷载场和高温温度场耦合作用下 7%、5%、3% 坡度和平坦路段沥青路面结构的最大拉应力、最大剪应力和最大路表弯沉, 计算结果分别见表 3 和图 4。

表 3 不同坡度下最大路表弯沉
Tab. 3 Maximum surface deflections with different gradients

坡度/%	0	3	5	7
弯沉/($\times 0.01 \text{ mm}$)	103.4	105.4	107.6	110.0

(1) 由图 4 (a) 可知, 高温下各层最大正应力随着坡度的增大而增大, 曲线间间距最大是上面层上半部分 (距路表 2 cm 深度范围内) 和下面层层底附近, 说明这两个位置是最大正应力增幅较大的位置, 即受道路纵坡影响最大的位置。另外, 从图 4 (a) 还可以发现, 路面最大正应力除在路表 2 cm 深度范围内是正值外, 其余均为负。可见, 高温下上坡路面除在距路表 2 cm 深度范围内存在拉应力外, 其他任意深度均受压。

(2) 由图 4 (b) 可知, 高温时不同道路纵坡下各层最大剪应力曲线几乎重叠在一起, 只有面层 4 cm 内的差值稍微大些, 但差值最大的路表剪应力也仅仅增大了 0.019 8 MPa。可见, 在 7% 坡度内变化的

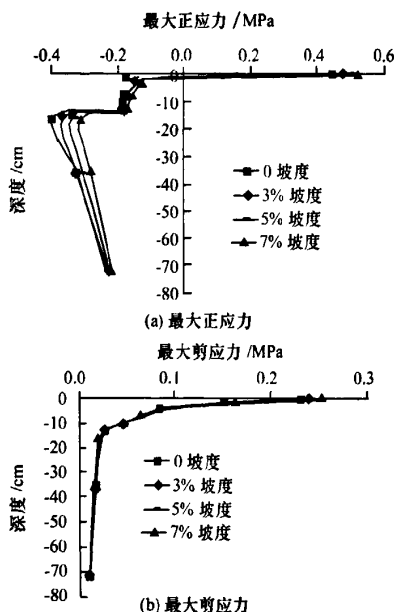


图4 不同坡度下最大正应力和最大剪应力

Fig. 4 Maximum positive stresses and maximum shear stresses with different gradients

道路纵坡对路面结构剪应力影响很有限。

(3) 由表3可知,高温下最大路表弯沉随着坡度的增大而增大。其中,7%坡度路段的最大路表弯沉仅比平坦路段的大0.067 mm。说明道路纵坡对路表弯沉的影响相对较小。

由此可见,高温下道路纵坡对路面结构各个主要指标均存在一定程度的影响。其中,影响最大的是最大正应力,特别是上面层上半部分(距路表2 cm深度范围内)和下面层层底附近。另外,路面除在距路表2 cm深度范围内存在拉应力外,其他任意深度均受压。而高温下沥青路面本身抗拉强度又变小,外加在行车荷载的反复作用,上面层最容易出现开裂破坏。

3.2 应力场

为确定温度场对上坡路面力学特性的影响程度,分别计算分析5%坡度时纯荷载场(路面结构参数也按图3取值,但不考虑温度场的影响)、纯温度场和两者耦合场下各路面结构的最大拉应力、最大剪应力和最大路表弯沉3个主要指标的分布规律,计算结果详见图5和表4。

表4 不同应力场下最大路表弯沉

Tab. 4 Maximum surface deflections with different stress fields

应力场	纯荷载场	荷载场与温度场耦合
弯沉/($\times 0.01$ mm)	88.5	107.6

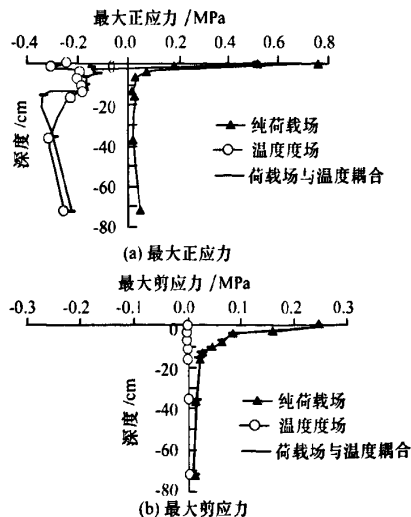


图5 不同应力场下最大正应力和最大剪应力

Fig. 5 Maximum positive stresses and maximum shear stresses with different stress fields

(1) 由图5(a)可知,在纯荷载场作用下,路面结构各层位均存在拉应力,且拉应力随着路面结构深度的增加而减小,即最大拉应力值0.759 4 MPa出现在路表。在纯温度场作用下,路面各结构层均受压,压力峰值出现在路表下2 cm处,也就是温度峰值出现的层位。而在温度场和荷载场的综合作用下,除路表存在拉应力0.500 5 MPa外,其他层位均受压,且压应力随路面结构深度增加先增大后减小。可见,温度场的存在对路面的最大拉应力影响较小。

(2) 由图5(b)可知,在纯温度场作用下,各层最大剪应力都非常小。且纯荷载场与耦合场下路面各结构层的最大剪应力曲线几乎重合。

(3) 从表4可知,荷载场与温度场耦合作用下的最大路表弯沉是纯荷载场下最大路表弯沉的1.2倍。可见,温度场的存在会使路表弯沉明显增大。

(4) 由计算结果可知,在纯温度场作用下,路面结构整体发生膨胀,路表上移。高温下沥青路面发生膨胀,即沥青混合料发生了膨胀,混合料发生膨胀意味着作为其体积组成之一的空隙率就会增大,也就是说高温下沥青路面可进一步压密的空间增大。在荷载反复作用下,就容易出现轮迹下局部压密而“下陷”的现象。而同样由于行车荷载的作用,容易导致车轮下的混合料膨胀受阻,唯一的出路是使两边的混合料鼓起。此外,值得注意的是,高温时沥青混合料模量变小,更容易发生变形,这使得中间下陷、两边鼓起的沥青路面车辙更容易实现了。

由此可见,温度场的存在对应力的影响都比较

小,但会使路表弯沉明显增大。在行车荷载的作用,容易出现中间下陷、两边鼓起的沥青路面车辙破坏。

4 沥青路面车辙调查

4.1 车辙深度分布

在近几年夏季高温的作用下,京珠高速公路广韶路段通车2 a后沥青路面出现了严重的车辙破坏,特别是长大纵坡路段,这与第3节分析结果相吻合。对该路段车辙病害调查,其车辙深度的分布如图6所示。

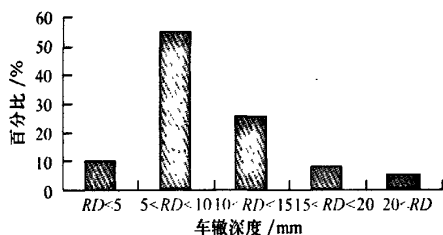


图6 车辙深度分布图

Fig. 6 Distribution of rutting depth

由图6可知,90%以上路段的车辙深度是大于5 mm的,并且其中约有5%是超过20 mm的。此外,对调查资料进行统计发现:全线平均车辙深度(ARD)达到10 mm,最大车辙深度超过了30 mm。可见,该路段的车辙病害非常严重。

4.2 车辙断面形状分析

为了真实地了解沥青各面层内车辙发生的状况和程度,还对该高速公路典型车辙病害路段中的17处主车道进行了横断面开挖和钻芯取样,并对各面层厚度与变形情况进行了检测,得到了典型的的车辙断面形态,如图7所示。

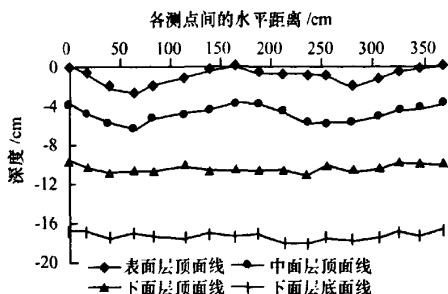


图7 典型的的车辙断面形态

Fig. 7 Typical cross-section shape of rutting

从图7可以看出:

(1) 该处左、右轮车辙深度分别为27 mm和25 mm,开挖后基层顶面未发现沉陷与开裂,说明车辙变形全部由沥青面层产生,且上、中、下层发生变形

的程度各不相同的;

(2) 从断面形状和轮迹处各层的变形量分析可知:中面层变形最大即约占车辙总量的60%,上面层约为25%,下面层约为15%。显然,这与中面层承受着高压应力和剪切应力,而一般中面层的抗剪切能力不足有关。

5 设计建议与工程应用

5.1 路面结构设计建议

根据以上分析结果,对上坡路段沥青路面结构设计提出以下建议:

(1) 上面层在满足抗滑要求的前提下,设计时应尽量选用纤维等改性沥青混凝土,以提高上坡路段上面层的抗拉强度。

(2) 针对高温下上坡路段沥青路面车辙均源于面层,其中面层变形约占车辙总量的60%,故建议首先应着眼于对高温稳定性有决定性作用的混合料级配的选择,可考虑将级配设计成S形骨架结构,并尽可能采用棱角性较好的机制砂,以便增加集料的相互嵌挤作用,提高面层的高温稳定性。另外鉴于沥青胶结料对混合料的剪切变形能起到制约效果,设计时也应

对沥青进行改性,提高其高温稳定性指标。据此对上、中面层的沥青混合料进行设计:上面层采用PG82+0.7% (0.3%聚酯+0.4%木质素)纤维SMA13、中面层采用AH-70+0.3%抗车辙剂AC-20,并在广韶路段的上坡处铺筑了50 km试验路。

5.2 工程应用

在广韶高速公路k261+500~k262+000南行第1车道铺筑了500 m的试验段,2007年夏季前后的车辙跟踪调查发现(见图8):除K256段外其他路段车辙发展比较缓慢,绝大部分路段平均车辙深度小于3 mm,除个别点外最大车辙深度也基本小于5 mm。尽管该路段施工前路况最差,但目前路况仍相当优良,使用性能与其他普通路段相当,其效果非常明显。

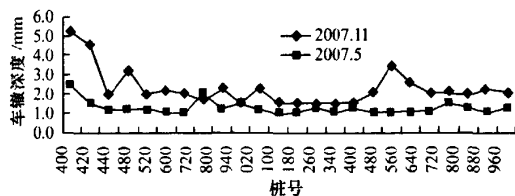


图8 试验路车辙调查结果

Fig. 8 Investigation result of rutting on the test road

6 结语

(1) 高温下道路纵坡对路面结构各个主要指标均存在一定程度的影响,受影响最大的位置是距路表 2 cm 深度范围内和下面层底附近。

(2) 路面除在距路表 2 cm 深度范围内存在拉应力外,其他任意深度均受压。而高温下沥青路面本身抗拉强度又变小,外加在行车荷载的反复作用,上面层最容易出现开裂破坏。设计时应尽量选用纤维等改性沥青混凝土,以提高上坡路段上面层的抗拉强度。

(3) 温度场的存在对剪应力和拉应力的影响都较小,但会使路表弯沉增加比较多。在行车荷载的作用下,容易出现车辙破坏。在路面材料组成设计时,可以选用成 S 形骨架结构级配,并尽可能采用棱角性较好的机制砂,以便增加集料的相互嵌挤作用,同时考虑对沥青进行改性,提高面层的高温稳定性。

(4) 车辙调查分析发现车辙变形一般均由沥青面层产生,且上、中、下层发生变形的程度各不相同;从断面形状和轮迹处各层的变形量分析可知,中面层变形最大,即约占车辙总量的 60%,上面层约为 25%,下面层约为 15%,显然这与中面层承受着高压应力和剪切应力,而一般中面层的抗剪切能力不足有关。说明在研究车辙问题时,除上面层的车辙问题必须引起足够重视外,提高中面层的抗剪切能力也是至关重要的。

(5) 本文所设计试验路的多次车辙调查表明,采用该设计的试验路段车辙发展缓慢,能适应炎热环境温度下长大纵坡的道路交通。

参考文献:

References:

- [1] 张起森.道路工程有限元分析法[M].北京:人民交通出版社,1983.
ZHANG Qisen.Finite Element Analysis Method for Road Engineering[M].Beijing:China Communications Press,1983.
- [2] 中华人民共和国交通部.JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2006.
P.R.China.Ministry of Communications.JTG D50-2006 Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement[S].Beijing:China Communications Press,2006.
- [3] 刘国锋.广韶高速公路沥青路面高温车辙及其影响因素分析[D].长沙:长沙理工大学,2006:31-39.
LIU Guofeng.Rutting and Influencing Factor of Asphalt Pavement in Guangzhou-Shaoguan Expressway[D].Changsha:Changsha University of Science & Technology,2006:31-39.
- [4] Asphalt Institute.Superpave Mix Design (SP-2)[M].Texas:Asphalt Institute,1996.
- [5] 王丽.道路结构温度场实测研究[J].公路,2003(8):30-35.
WANG Li.A Study on Actual Measurement of Temperature Field of Road Structure[J].Highway,2003(8):30-35.
- [6] 查旭东.沥青路面反算模量的温度修正[J].公路,2002(6):51-53.
ZHA Xudong.Temperature Adjustment for Back Calculation Moduli of Asphalt Pavement[J].Highway,2002(6):51-53.
- [7] 谭积青.京珠南高速公路沥青路面车辙调查与分析报告[R].广州:广东省路桥建设发展有限公司,2005.
TAN Jiqing.Report of Investigation of Rutting on Beijing-Zhuhai South Section Expressway[R].Guangzhou:Guangdong Road & Bridge Construction Development Co.,Ltd.,2005.
- [8] HUANG W H, SUNG Y L, LIN J D, et al.Effects of Heavy Vehicle and Tire Pressure on Flexible Pavement Design in Taiwan[C]//Proceedings of Transportation Research Board 80th Annual Meeting.Washington, D. C.: Transportation Research Board,2001.
- [9] 封基良,许爱华,席晓波.沥青路面车辙预测的粘弹性分析方法[J].公路交通科技,2004,21(5):12-15.
FENG Jiliang, XU Aihua, XI Xiaobo.Visco-elastic Method for Prediction of Asphalt Pavement Rutting[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2004,21(5):12-15.
- [10] 徐世法.高等级道路沥青路面车辙的预估控制与防治[D].上海:同济大学,1991.
XU Shifa.Prediction and Control of Rutting in Asphalt Pavements of High-grade Highway[D].Shanghai:Tongji University,1991.
- [11] 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 Xuejun, HUANG Xiaoming.Experiment Research on High-temperature Deformation Indexes of Asphalt Mixtures[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2006,23(10):37-40.
- [12] 梁春雨,李艳玲,陈志国.硬质沥青混合料动态间接拉伸试验研究[J].公路交通科技,2008,25(9):13-17.
LIANG Chunyu, LI Yanling, CHEN Zhiguo.Study on Dynamic Indirect Tensile Test of Hard Asphalt Mixture[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2008,25(9):13-17.