

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.04.006

南方地区混凝土基层沥青路面层间 抗剪强度结构系数研究

李 盛, 刘朝晖, 李宇峙
(长沙理工大学, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对混凝土基层沥青路面的特点和现有研究的不足, 提出了混凝土基层沥青路面适宜的层间结构与材料, 测试了层间沥青材料的高温剪切性能与黏度; 研发了层间剪切疲劳的测试装置, 提出了层间剪切疲劳的试验方法; 运用有限元法计算了混凝土基层沥青路面在高温季节层间温度与沥青层厚度的关系, 确定了层间剪切疲劳的试验温度; 通过测试和分析, 提出混凝土基层沥青路面层间喷洒沥青的最佳用量为 1.4 kg/m^2 , 层间抗剪强度结构系数为 $K_T = 0.50N_e^{0.12}$ 。

关键词: 道路工程; 混凝土基层沥青路面; 有限元法; 抗剪强度试验; 剪切疲劳试验;

中图分类号: U416.224; U416.01

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2015)04-0028-06

Research on Shear Strength Structure Coefficient of Concrete Base Asphalt Pavement in Southern China

LI Sheng, LIU Zhao-hui, LI Yu-zhi
(Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: Focusing on the characteristics and the flaws of existing studies of concrete base asphalt pavement, the appropriate interlaminar structure and material of concrete base asphalt pavement are proposed, and the high temperature shear performance and viscosity of interlaminar asphalt material are tested. A test apparatus for interlaminar shear fatigue is developed, and the test method of interlaminar shear fatigue is proposed. The relationship between interlaminar temperature and asphalt layer thickness in high temperature season is calculated by using FEM, and the test temperature of interlaminar shear fatigue is determined. By test and analysis, it is proposed that the optimum dosage of interlaminar spraying asphalt of concrete base asphalt pavement is 1.4 kg/m^2 , and the interlaminar shear strength structure coefficient is $K_T = 0.50N_e^{0.12}$.

Key words: road engineering; concrete base asphalt pavement; finite element method (FEM); shear strength test; shear fatigue test

0 引言

近年来以普通水泥混凝土(PCC)、碾压混凝土(RCC)、贫混凝土(LCC)、横缝设传力杆的普通混凝土(JPC)、连续配筋混凝土(CRC)等作为基层的沥青路面得到了快速发展, 很多早期修建的旧水

泥混凝土路面也大多通过加铺沥青面层进行维修和提质改造。混凝土基层沥青路面的刚性基层能大大提高路面结构的承载力, 沥青面层能减小混凝土层的温度翘曲应力和荷载应力, 并能有效改善行车的舒适性^[1-2], 不足是由于混凝土基层与沥青面层的回弹模量相差较大, 体积膨胀收缩时变形协调性差,

收稿日期: 2013-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178062); 湖南省自然科学基金项目(14JJ7041); 湖南省教育厅科学研究项目(14B001)

作者简介: 李盛(1980-), 男, 内蒙古集宁人, 博士, 副教授。(lishengttt@163.com)

且加铺的沥青面层一般较薄,有时甚至只有几厘米,在高温和荷载的长期作用下,沥青的劲度模量降低,黏聚力减小,抗剪强度也随之减少,沥青面层尤其是结合界面容易因为抗剪能力不足而引起滑移、开裂和变形等病害^[3]。

沥青面层厚度对混凝土基层沥青路面的层间剪应力影响较大,现有行业规范^[4-5]还没有混凝土基层沥青路面结构沥青面层的厚度设计方法。已有研究指出^[2,6-7],沥青面层的厚度设计应以产生层间剪切疲劳失稳为极限状态,即结构的层间剪应力应小于层间容许剪应力,层间容许剪应力需由层间抗剪强度结构系数来确定,抗剪强度结构系数一般通过剪切疲劳试验来确定。目前国内外还没有关于路面层间剪切疲劳的测试装置及方法,也没有提出混凝土基层沥青路面的层间抗剪强度结构系数。因此,研究混凝土基层沥青路面的层间抗剪强度结构系数有重要意义,研究成果可为混凝土基层沥青路面的合理设计提供参考。

1 层间结构与材料

1.1 层间结构

混凝土基层沥青路面的层间结构可采用喷洒式、浸渍沥青土工布、铺装式3种结构^[6]。一般选用喷洒式结构,喷洒的热沥青多为改性沥青,为保证层间材料的黏结力与嵌挤作用,沥青用量一般为1.2~2.2 kg/m²,喷洒完热沥青后再撒13.2~16 mm的单一粒径碎石,撒布面积为40%~60%^[3]。

1.2 层间沥青材料高温性能测试

层间剪切破坏主要发生在高温季节,这要求层间沥青材料在高温下仍能保持较大的黏度和良好的抗剪性能。在进行层间剪切疲劳试验前,先对层间改性沥青材料的剪切性能和黏度进行评价,所用设备为美国战略性公路研究计划SHRP(Strategic Highway Research Program)开发的PG(Performance Grade)分级系列设备中的剪切流变仪。基质沥青采用SK-70,改性剂为线型结构的SBS,掺量为4%。试验方法参照美国国家公路与运输协会标准AASHTO T315—08^[8]。

(1) 高温性能试验

对原样SBS改性沥青及旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)后残留的SBS改性沥青试样进行动态剪切试验,试样直径为25 mm,厚度为1 mm,剪切速率为10 rad/s,试验结果如表1所示。

表1 SBS改性沥青动态剪切试验结果

Tab. 1 Result of dynamic shear test of SBS modified asphalt

沥青试样	试验温度/ ℃	$G^* \cdot \sin \delta^{-1}$ / kPa	技术要求/kPa
原样 SBS 改性 沥青	70	1.98	≥ 1.0
	76	1.10	
	82	0.66	
RTFOT 老化后残 留 SBS 改性沥青	70	3.40	≥ 2.2
	76	1.65	

从表1可以看出,按美国PG分级的概念,SBS改性沥青的高温等级较好,可定为PG76。因SBS改性沥青的抗老化能力较基质沥青有较大增强,RTFOT老化后 $G^* \cdot \sin \delta^{-1}$ 值的增加量较小,所以难以满足与老化前相同等级对 $G^* \cdot \sin \delta^{-1}$ 的要求,只能满足低一个等级的要求。

(2) 黏度试验

沥青的黏度能表征沥青在外力作用下抵抗剪切变形的能力,对层间结构的黏结强度和抗剪强度有直接影响^[9]。试验中采用Rotation模式进行温度扫描,剪切速率为10 s⁻¹,升温速率为2℃/min,升温幅度为50~170℃。因60℃黏度可以反映沥青在盛夏季节的耐热性,135℃或更高温度的黏度可以评价改性沥青的施工性能,试验中重点分析SBS沥青试样RTFOT老化后60℃和135℃的黏度,试验结果如表2所示。

表2 黏度试验结果

Tab. 2 Result of viscosity test

沥青试样	试验温度/℃	黏度/(Pa·s)
RTFOT 老化后残留 SBS 改性沥青	60	846.37
	135	1.41
	165	0.49

上述试验结果表明,SBS改性沥青60℃的黏度值较高,135℃的黏度也较好,是一种比较理想的层间喷洒材料。

2 剪切疲劳测试装置及方法

目前国内外主要采用直剪法进行层间抗剪强度测试,也有采用斜剪法或通过旋转成不同倾斜角度来进行剪切强度试验,但还没有专门用于评价路面层间剪切疲劳性能的装置,实际上直剪法只考虑了路面结构受到水平面应力而未考虑垂直压应力,不符合路面结构的实际受剪状态,所以直剪法不能准确评价路面结构的层间抗剪强度和剪切疲劳性能,

而已有斜剪法也仅仅局限于测试剪切强度,一般都用于测试材料的剪切强度,很少用于测试结构的剪切强度,也不能用于测试疲劳性能。因此,测试路面结构的层间剪切疲劳需专门的装置及方法。

2.1 试验装置

采用笔者自主研发的一种适用于测试路面层间剪切疲劳的装置及方法(ZL20111044069 7.0, 2013年12月授权,笔者为第一发明人)所述的装置及方法进行层间剪切疲劳试验。

试验装置包括加载系统、压块、支撑块和支撑平台,加载系统为从美国进口的MTS-810(Material Test System-810),加载杆的下端接压块,支撑块设置在支撑平台上,支撑块和支持平台之间设置钢珠,钢珠通过保持支架进行固定,压块的凹陷部和支撑块的凹陷部形状相同且均向同一方向倾斜 $26^{\circ}34'$ 。试验装置示意简图如图1所示,压块水平放置时的三视图如图2所示。

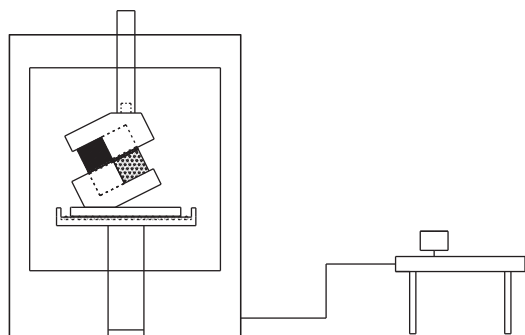


图1 试验装置示意简图

Fig.1 Schematic diagram of test apparatus

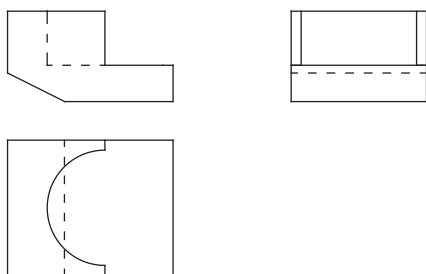


图2 压块三视图

Fig.2 Three-view drawing of briquetting

采用 $26^{\circ}34'$ 的倾斜角是更好地模拟车辆在紧急制动的最不利条件下路面结构的受力状态。研究表明^[2],紧急制动时路面结构受到的水平面应力为垂直压应力的0.5倍,故倾斜角 $\alpha = \arctan 0.5 = 26^{\circ}34'$ 。该装置结构简单、操作方便,可以在科研和实际工程中推广应用,也可以更真实地模拟路面结构的层间受剪状态。

2.2 试件制备

(1) 混凝土基层及黏层制作

在自行加工的车辙板试模中浇筑水泥混凝土试件,厚度为5 cm,浇筑水泥混凝土时先振捣密实,然后对水泥混凝土基层的表面进行裸化处理(去除浮浆),再将试件置于标准养生室进行养生,使其强度达到设计要求,最后将水泥混凝土试件的表面清理干净,均匀地洒上SBS改性沥青,再洒布13.2~16 mm的单一粒径碎石,洒布量为沥青洒布面积的50%,并立刻用力压紧碎石,使碎石表面尽量多地裹附沥青。

(2) 沥青层碾压成型

SBS黏结层冷却至室温后,将拌和好的沥青混合料倒入试模中的黏层上,然后用轮碾成型机碾压成型,碾压成型后让试模在室温下冷却,完全冷却后进行脱模,过程如图3、图4所示。

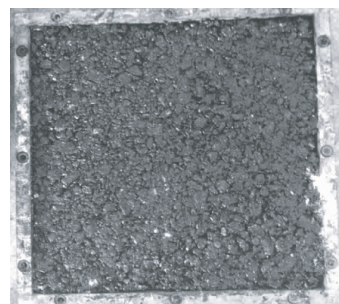


图3 沥青层碾压成型

Fig.3 Rolling compaction of asphalt layer

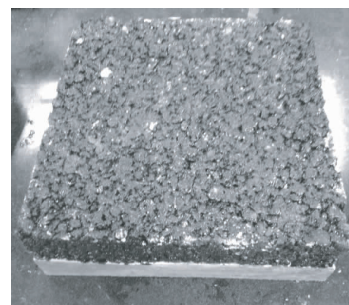


图4 脱模后复合试件

Fig.4 Composite sample after demoulding

(3) 钻芯及试件磨平

用钻芯机对脱模后的复合试件进行钻芯取样,芯样直径为5 cm,整个试件的高度为10 cm,芯样如图5所示。

由于沥青层是通过碾压成型,碾压过程中受设备限制及试模影响沥青混合料会有一定的推移,钻芯取样后试件表面很难完全平整,而试件的表面平整程度决定压块与试件能否接触良好,会对试验结果有一定



图5 脱模后的芯样

Fig. 5 Core sample after demoulding

的影响。为了尽可能地消除这种影响, 钻芯取样后的试件再通过磨平机进行磨平处理, 如图6所示。



图6 试件磨平

Fig. 6 Sample smoothing

2.3 试验温度

试验所需温度一般为夏季高温季节混凝土基层沥青路面的层间最高可达温度, 选用层间最高温度进行试验是考虑最不利气温状况下的层间剪切疲劳寿命。因此, 需计算混凝土基层沥青路面在夏季高温季节沥青层厚度与层间温度的关系。

运用 Fortran 语言子程序来扩展有限元主程序的功能, 定义随时间变化的外界温度并进行稳态和瞬态热传导分析, 实现对路面结构温度场的有限元模拟^[10-11]。计算南方某地区高温季节一天内连续变温条件下, 层间温度与沥青层厚度的关系, 沥青层厚度取4~14 cm时, 温度场计算参数如表3所示, 计算结果如图7所示。

回归层间最高温度与沥青层厚度的关系:

$$T = 0.0377h^2 - 1.7173h + 54.061, R^2 = 0.9999, \quad (1)$$

式中, T 为层间最高温度; h 为沥青面层厚度。

混凝土基层沥青路面的沥青层厚度一般为10 cm左右, 根据式(1)可知, 层间最高温度为40.688℃, 因此, 试验温度取41℃。

表3 温度场计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of temperature field

参数	沥青混凝土	水泥混凝土	水泥稳定碎石	土基
热传导率 $k/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	4 680	6 300	5 620	5 620
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 300	2 400	2 200	1 800
热容量 $C/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	925	970	910	1 050
太阳辐射吸收率			0.9	
路面发射率 ε			0.82	
绝对零度值 $T_z/^\circ\text{C}$			-273	
Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma/[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}]$			5.67×10^{-8}	

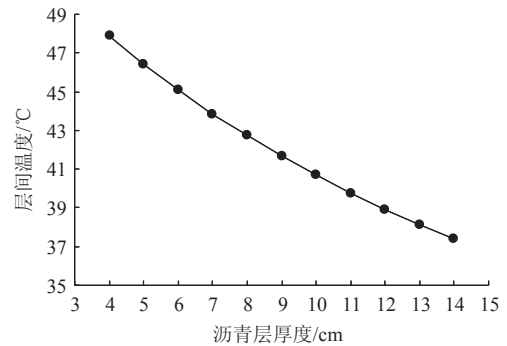


图7 层间最高温度与沥青层厚度的关系

Fig. 7 Relationship between interlaminar maximum temperature and thickness of asphalt layer

试验中需将已经制作好的试件置于环境箱中, 然后升温到41℃, 保温5 h以上, 再开始试验。

2.4 抗剪强度及剪切疲劳试验

(1) 抗剪强度试验

将试件放到支撑块和压块之间, 通过材料试验机启动升降杆, 使升降杆以2 mm/min的速度向下运动, 直至试件被剪切破坏, 根据破坏时的最大荷载, 计算出混凝土基层沥青路面的层间抗剪强度。做4次以上平行试验, 取平行试验测试结果的平均值。

(2) 剪切疲劳试验

疲劳试验有控制应力与控制应变两种方法, 控制应力数据点分散程度小, 所需的试件数量较少, 精度控制可靠^[12-13]。因此, 研究中采用控制应力的方法进行剪切疲劳试验。

按0.3~0.9倍的应力比(疲劳试验施加的荷载与抗剪强度试验时的最大破坏荷载之比)进行重复荷载作用下的剪切疲劳试验。每个应力比进行试验的试件个数不少于4, 考虑到正弦波的波形比较接近路面实际承受荷载的波形, 采用半正弦波进行加载^[12-13], 振幅为施加荷载的大小, 频率为10 Hz,

试件破坏时的累计作用次数即为疲劳寿命。

3 抗剪强度结构系数确定

(1) 层间喷洒沥青的最佳用量

为确定层间喷洒沥青的最佳用量,利用上述试验装置测试常温下层间 SBS 改性沥青在不同用量时的层间极限抗剪强度,分析确定层间喷洒沥青的最佳用量。试验中沥青的用量取 $1.2 \sim 2.2 \text{ kg/m}^2$,试验结果如表 4 所示。由表 4 可知,混凝土基层沥青路面层间喷洒沥青的最佳用量为 1.4 kg/m^2 。

(2) 剪切疲劳试验

按层间喷洒沥青的最佳用量制备试件,进行抗剪强度试验,试验温度取 41°C ,确定最大破坏荷载,试验结果如表 5 所示。

表 4 层间抗剪强度与沥青用量的关系

Tab. 4 Relationship between interlaminar shear strength and asphalt dosage

序号	沥青用量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	最大破坏荷载的 平均值/kN	抗剪强度/ MPa
1	1.2	30.455	1.734
2	1.4	35.130	2.000
3	1.6	31.706	1.805
4	1.8	27.882	1.588
5	2.0	25.457	1.450
6	2.2	23.783	1.354

表 5 层间抗剪强度试验结果

Tab. 5 Result of interlaminar shear strength test

序号	最大破坏 荷载/kN	层间抗剪 强度/MPa	层间抗剪强度 平均值/MPa	标准差	变异 系数/%
1	25.413	1.447	1.424	0.018	1.26
2	24.832	1.414			
3	24.687	1.406			
4	25.122	1.430			

按 $0.3 \sim 0.9$ 倍的应力比进行层间剪切疲劳试验,试验结果如表 6 所示。

表 6 层间剪切疲劳寿命试验结果

Tab. 6 Result of interlaminar shear fatigue life test

应力比	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
剪切疲劳寿命/次	247 233	73 052	6 016	454	154	121	63
标准差	0.110	0.057	0.045	0.028	0.036	0.027	0.014

从表 6 可以看出,随应力比的增大,混凝土基层沥青路面的层间剪切疲劳寿命显著下降。

(3) 抗剪强度结构系数确定

绘制 $\tau - N_f$ 曲线, τ 为层间受到的剪应力, N_f 为

剪切疲劳寿命,关系曲线如图 8 所示。

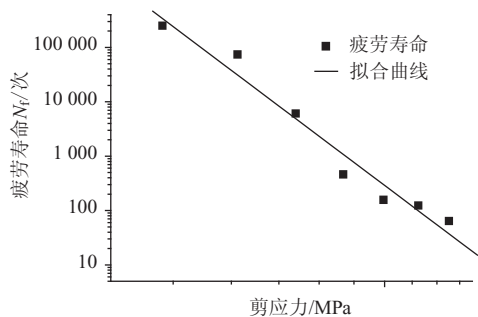


图 8 层间剪切疲劳寿命试验结果及曲线拟合

Fig. 8 Result of interlaminar shear fatigue life test and curve fitting

由图 8 可知,剪切疲劳寿命与剪应力呈对数线性关系,对该关系曲线进行拟合:

$$N_f = 289.40A_c\tau^{-8.298}, R^2 = 0.969, \quad (2)$$

式中, A_c 为层间沥青类型系数,层间沥青材料为 SBS 时 A_c 取 1。

由式 (2) 可得:

$$\tau = \left(\frac{289.40}{N_f} \right)^{\frac{1}{8.298}} = 1.97N_f^{-0.12}, \quad (3)$$

当 $N_f = 1$ 时,一次荷载作用下的层间抗剪强度 $\tau_f = 1.97$ 。

层间抗剪强度结构系数:

$$K_T = \frac{\tau_f}{\tau_R} = \frac{1.97}{1.97N_f^{-0.12}} = N_f^{0.12}. \quad (4)$$

根据已有研究可知^[14-15]:室内疲劳试验的荷载无时间间歇,与路面结构的实际力相比,会导致试件的疲劳寿命减少 $1/5$;试验中的试件是一维受力,路面结构是三维受力,试件的疲劳寿命为路面实际寿命的 $1/3 \sim 1/7$,此处取 $1/5$;车辆的轮迹分布系数取 0.5 ;本文剪切疲劳的试验温度是考虑夏季高温的不利季节,一般以每年 60 d 计。考虑这些影响因素后,室内试验的荷载作用次数 N_i 与行车荷载产生的轴载累计作用次数 N_e 的关系为:

$$N_f = \frac{1}{5} \times \frac{1}{5} \times 0.5 \times \frac{60}{365} N_e = 3.29 \times 10^{-3} N_e, \quad (5)$$

根据式 (4) 和式 (5) 可得:

$$K_T = N_f^{0.12} = 0.50N_e^{0.12}. \quad (6)$$

4 结论

(1) 提出了混凝土基层沥青路面适宜的层间结构与材料,测试了层间沥青材料的高温剪切性能与黏度。

(2) 研发了层间剪切疲劳的测试装置, 提出了层间剪切疲劳的试验方法。

(3) 运用有限元法计算了混凝土基层沥青路面在高温季节沥青层厚度与层间温度的关系, 确定了层间剪切疲劳的试验温度。

(4) 进行了层间抗剪强度试验和层间剪切疲劳试验, 通过测试和分析提出混凝土基层沥青路面层间喷洒沥青的最佳用量为 1.4 kg/m^2 , 层间抗剪强度结构系数为 $K_T = 0.50N_e^{0.12}$ 。

参考文献:

References:

- [1] 李盛, 刘朝晖, 李宇峙. CRC + AC 复合式路面结构层厚度对温度效应及车辙变形的影响 [J]. 中国公路学报, 2012, 25 (1): 21 - 28.
LI Sheng, LIU Zhao-hui, LI Yu-zhi. Influence of Structure Layer Thickness of CRC + AC Composite Pavement on Temperature Effect and Rutting Deformation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (1): 21 - 28.
- [2] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计原理与施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 1 - 3.
HU Chang-shun, WANG Bing-gang. Design Principle and Construction Technology of Composite Pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 1999: 1 - 3.
- [3] 李盛, 李宇峙, 刘朝晖. 刚柔复合式路面沥青层温度疲劳损伤及开裂研究 [J]. 工程力学, 2013, 30 (10): 122 - 127.
LI Sheng, LI Yu-zhi, LIU Zhao-hui. Research on Temperature Fatigue Damage and Cracking in Asphalt Concrete Layer of Rigid-flexible Composite Pavement [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (10): 122 - 127.
- [4] JTG D40—2011, 公路水泥混凝土路面设计规范 [S].
JTG D40—2011, Specifications for Design of Highway Cement Concrete Pavement [S].
- [5] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S].
JTG D50—2006, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [6] 刘朝晖. 连续配筋混凝土刚柔复合式沥青路面研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
LIU Zhao-hui. Research on Rigid-flexible Composite Asphalt Pavement of Continuously Reinforced Concrete [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007.
- [7] 周志刚. 交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2003: 77 - 79.
- ZHOU Zhi-gang. Research on Fatigue Damage Cracking in Asphalt Pavement under Traffic Load [D]. Changsha: Central South University, 2003: 77 - 79.
- [8] AASHTO T315-08, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) [S].
- [9] SHENOY A. Refinement of the Super Pave Specification Parameter for Performance Grading of Asphalt [J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 43 (3): 34 - 35.
- [10] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 153 - 160.
LIAO Gong-yun, HUANG Xiao-ming. Application of ABAQUS Finite Element Software in Highway Engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008: 153 - 160.
- [11] 康海贵, 郑元勋, 蔡迎春, 等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析 [J]. 中国公路学报, 2007, 20 (6): 13 - 16.
KANG Hai-gui, ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, et al. Regression Analysis of Actual Measurement of Temperature Field Distribution Rules of Asphalt Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (6): 13 - 16.
- [12] 吕松涛. 老化沥青混合料粘弹性疲劳损伤特性研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008: 19 - 22.
LÜ Song-tao. Research on Viscoelastic Fatigue Damage of Aged Asphalt Mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2008: 19 - 22.
- [13] 郑健龙, 吕松涛. 沥青混合料非线性疲劳损伤模型 [J]. 中国公路学报, 2009, 22 (5): 21 - 28.
ZHENG Jian-long, LÜ Song-tao. Nonlinear Fatigue Damage Model for Asphalt Mixtures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (5): 21 - 28.
- [14] 郑木莲, 王秉纲, 胡长顺. 多孔混凝土疲劳性能的研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17 (1): 7 - 11.
ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Study of Fatigue Property of Porous Concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (1): 7 - 11.
- [15] 许志鸿, 李淑明, 高英, 等. 沥青混合料疲劳性能试验研究 [J]. 交通运输工程学报, 2001, 1 (1): 20 - 24.
XU Zhi-hong, LI Shu-ming, GAO Ying, et al. Research on Fatigue Characteristic of Asphalt Mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1 (1): 20 - 24.