

文章编号: 1000-4750(2012)09-0166-11

加筋沥青路面 APA 试验及其非线性疲劳损伤分析

周志刚, 袁秀湘

(长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南, 长沙 410004)

摘 要: 应用沥青路面分析仪(APA)对沥青路面结构模拟试件进行多种荷载下的往返轮载疲劳试验, 对比研究土工布、玻璃纤维格栅对沥青路面疲劳性能的加筋效果。在此基础上, 提出沥青混合料非线性疲劳损伤演化模型, 应用基于疲劳损伤力学的非线性有限元方法模拟 APA 试验过程, 分析了试件应力、变形、疲劳寿命等, 并与试验结果对比, 论证了所提疲劳损伤演化模型的合理性, 指出因加筋材料的桥联效应显著地改善了裂缝穿过筋材后路面的受力变形状况, 有效地延长路面的疲劳寿命。同时, 基于疲劳损伤分析, 进一步验证了 Paris 公式可用于描述路面结构的疲劳裂缝稳定发展过程, 并获得了有关的参数。

关键词: 沥青路面; 疲劳试验; 沥青路面分析仪; 加筋; 非线性疲劳损伤; 仿真

中图分类号: U416 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.12.0896

APA TEST AND NONLINEAR FATIGUE DAMAGE ANALYSIS OF THE REINFORCED ASPHALT PAVEMENT

ZHOU Zhi-gang, YUAN Xiu-xiang

(Changsha University of Science & Technology, Key Laboratory of Road Structure & Material,

Ministry of Transport of PRC, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: Wheel repeated loading test is carried out to the asphalt pavement specimen under several loading levels by using Asphalt Pavement Analyzer (APA) to compare the reinforcing effect of fabric and glassgrid on the fatigue characteristics of asphalt pavement. Based on this, one nonlinear fatigue damage model is suggested. By using fatigue damage mechanics-finite element method, the paper simulated numerically the total process of the APA test, and analyzed the stress, displacement and fatigue life of specimens. The comparison between the results of simulation and test proves the rationality of the suggested model. It is pointed out that using reinforcing material can remarkably improve the stress and displacement levels in pavement after the crack spreads across the reinforcement, and so to increase the pavement's fatigue life effectively due to the bridge effect of reinforcing materials. Besides, based on the fatigue analysis, it is proved further that Paris equation can be used to describe the spreading process of the fatigue crack in pavement, and related parameters can be obtained accordingly.

Key words: asphalt pavement; fatigue test; Asphalt Pavement Analyzer (APA); reinforcement; nonlinear fatigue damage; simulation

沥青路面在交通荷载的弯拉与剪切作用下的疲劳性能是表征沥青路面耐久性的重要性质之一。为了提高沥青路面疲劳寿命, 措施之一是在沥青路面结构中加设一层玻璃纤维格栅、加强土工布等土工加筋材料。人们以往主要通过结构模拟疲劳试

验, 对比分析加筋与否结构疲劳寿命的差异或不同加筋材料的效果, 以研究开发各类加筋材料并将之应用于沥青路面结构, 提出加筋路面结构设计方法与工艺。由于疲劳试验装置与方法不同, 所得研究结论有所差别, 这也直接导致对不同土工加筋材料

收稿日期: 2010-12-29; 修改日期: 2011-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778027); 湖南省自然科学基金项目(04JJ3033); 广西交通科技计划项目(桂科攻 0992009-5)

通讯作者: 周志刚(1966—), 男, 长沙人, 教授, 博士, 博导, 中国力学学会湖南省分会理事, 从事道路工程研究(E-mail: zzgcs@yahoo.com.cn).

作者简介: 袁秀湘(1965—), 女, 长沙人, 高级实验师, 硕士, 从事道路工程及试验检测研究(E-mail: yxx5219@126.com).

的加固沥青路面结构的机理认识不足,甚至出现错误认识,过分夸张了有关材料的加筋效果^[1-7]。鉴于沥青混合料以及路面结构的疲劳破坏实质上是材料局部出现劣化损伤并逐渐扩展、发展成为裂缝直至断裂破坏的过程,为此需要在试验基础上进一步应用疲劳损伤力学理论与方法揭示材料及结构疲劳损伤破坏的演化过程,深刻认识疲劳破坏的机制以及加筋作用的机理。

美国战略公路研究计划(SHRP)研制开发的沥青路面分析仪(Asphalt Pavement Analyzer,简称APA)是一种往返轮载试验装置。这类试验装置是针对沥青混合料与其它材料组合模拟的路面结构模型(梁式试件),采用小轮在模型表面沿直线往返运动,模拟车轮运动状态对试件进行疲劳加载。由于其试验模式接近实际路面受力状态,因而受到人们的关注。本文作者利用长沙理工大学购置的APA设备对沥青混合料梁式试件及其采用土工布、玻璃纤维格栅加筋结构试件,在不同循环加载水平下进行了往返加载疲劳弯曲试验,比较了不同加筋材料的加筋效果。进而提出沥青混合料的非线性疲劳损伤演化模型,并根据有关材料疲劳试验结果确定模型参数,在此基础上应用疲劳损伤力学理论与方法分析有关的沥青路面模拟结构疲劳损伤演化过程,进一步论证所提出的疲劳损伤演化模型的合理有效性,深刻阐释有关结构的疲劳破坏机制以及加筋材料的加筋机理,为后续相关研究提供参考依据。

1 材料与试验结果

沥青为泰普克 70#沥青,矿料由花岗岩破碎而得。APA 试验用 AC-13I 级配沥青混凝土。试验用加筋材料为一种土工布和玻璃纤维格栅。材料的详细资料参见文献[8]。

APA 试验中,环境温度为 15℃。试件成型后在室温下至少保持 4h, APA 环境温度下恒温 1h 再进行试验。针对无筋沥青混凝土试件设置四级循环加载: $P_0=50\text{kg}$ 、 $P_0=90\text{kg}$ 、 $P_0=100\text{kg}$ 、 $P_0=110\text{kg}$;对铺设土工布、玻璃纤维格栅的沥青混凝土试件设置三级循环加载: $P_0=90\text{kg}$ 、 $P_0=100\text{kg}$ 、 $P_0=110\text{kg}$ 。进行疲劳试验时,每组同时对三个试件进行平行试验。试件的标准尺寸为 $30.0\text{cm}\times 12.5\text{cm}\times 7.5\text{cm}$,加筋材料铺设在距试件底表面 1.5cm 位置。为了便于计算分析处理和加快沥青混凝土试件的疲劳损伤破坏,将试件放入试模时,在其下部不设垫块。试

验过程中,试模支撑部位对试件两端面下部会施加一定的约束。加载轮以恒定的压力在试件表面往返运动,通过计算机的数据采集系统,自动对试件上表面的位移变形量定时进行采集,并绘出位移变形与运行次数的关系曲线。

试件跨中挠度 W 随循环加载次数 N 变化的典型曲线,如图 1 和图 2 所示。图 2 为在 $P_0=100\text{kg}$ 循环加载下土工布、土工格栅加筋试件的挠度变化曲线。与图 1 相比,可以发现,加筋试件的疲劳寿命的确长于无筋试件的疲劳寿命。

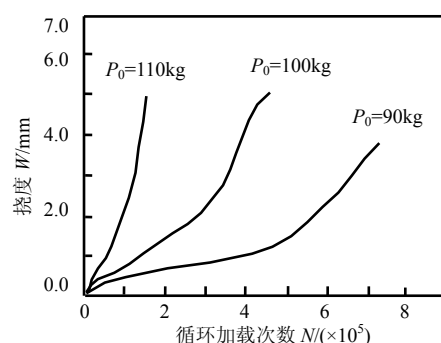


图 1 无筋试件的挠度随循环荷载的变化

Fig.1 Change of displacement of unreinforced specimen with cyclic loading

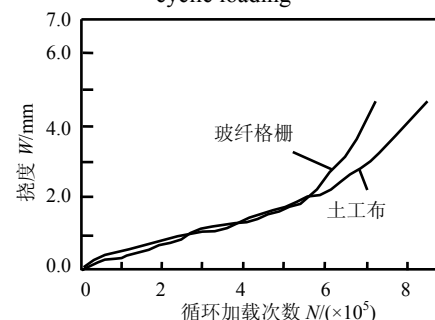


图 2 加筋试件的挠度随循环荷载的变化

Fig.2 Change of displacement of reinforced specimen with cyclic loading

根据疲劳试验现象,不同循环加载下无筋试件开裂时的疲劳寿命如表 1 所示。因试模支撑部位对试件两端面下部施加了约束,试件非简单支撑,表中同时给出相应循环荷载下由有限元计算得到的试件跨中底部弯拉应力值。根据表 1 中数据按双对数坐标下的最小二乘法得到 APA 试验沥青混合料的疲劳方程:

$$N = 17620\sigma^{-3.24} \quad (r = -0.926) \quad (1)$$

由表 2 所列试件断裂时疲劳寿命数据对比可知,在沥青混合料试件底部铺设土工布或玻璃纤维格栅,可延长试件疲劳寿命约 1 倍以上,的确可以起到加筋沥青路面的效果。

表 1 无筋试件疲劳开裂寿命

Table 1 Fatigue cracking lives of unreinforced specimens

循环荷载 P_0/kg	110	100	90	50
弯拉应力 σ/MPa	0.484	0.440	0.396	0.220
疲劳开裂寿命/次	102060	346860	542400	2059500

表 2 无筋试件和加筋试件疲劳寿命对比

Table 2 Comparison between the fatigue lives of unreinforced and reinforced specimens

试件类型		循环荷载 P_0/kg		
		110	100	90
无筋	疲劳寿命	158400	398100	704280
	比值	437160	724500	1605720
土工布	疲劳寿命	2.76	1.82	2.28
	比值	310440	828000	1387380
玻璃纤维格栅	疲劳寿命	1.96	2.08	1.97
	比值			

2 沥青混合料非线性疲劳损伤演化模型及其疲劳损伤特性参数

关于沥青混合料疲劳损伤,近年国内外开展了一些研究工作。一般基于两类损伤理论:弹性损伤^[9-13]、粘弹性损伤^[14-19]。这些研究中尽管应用损伤力学理论与方法,但损伤值一般用试件的刚度或模量的变化来定义,这些参量的确定均具有整体平均意义,并不能真实地反映试件局部损伤及其发展过程。其原因主要是在这些试验中未能获取试件局部应变、微观结构变化等与损伤直接相关的信息。为此,本文将采用反分析的方式,研究提出能真实体现沥青混合料损伤演化的模型,即首先提出沥青混合料的非线性疲劳损伤演化模型,然后应用数值仿真分析的方法演绎疲劳试验过程,将所得结果与疲劳试验有关结果进行对比,论证所提模型的正确合理性。对于混凝土试件,采用如下的疲劳损伤演化方程^[20]:

$$\frac{dD}{dN} = a^* \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^p (1-D)^{-q} \quad (2)$$

式中: a^* 、 p 、 q 为材料的疲劳损伤特性参数,与载荷循环特征及温度有关; D 、 N 分别为试件内部损伤值和荷载作用次数; σ 为实际应力。

假定沥青混合料梁式试件损伤前拉压弹性模量没有区别,即具有各向同性性质,但对于弯拉试件,其损伤破坏体现为拉伸形式,应出现在梁式试件的受拉一侧,而假定受压一侧不会出现因损伤引起的力学性质的变化,故沥青混合料梁式试件的拉压分区各自的应力为:

受拉区:

$$\sigma = E(1-D)\varepsilon = E(1-D)(z_0 - z) / \rho \quad (3)$$

受压区:

$$\sigma = E\varepsilon = E(z_0 - z) / \rho \quad (4)$$

式中: ρ 为所分析断面处梁的曲率半径; z 为分析点坐标; z_0 为损伤前试件断面上拉压分区位置坐标。

因此,当梁式试件表面出现疲劳裂缝时,根据损伤演化过程及其损伤累积效应分析,当试件受拉表面最危险点累积损伤值达到 1 时所对应的试件疲劳寿命(疲劳裂纹形成寿命)为:

$$N_{cr} = \int_0^1 \frac{1}{a} \left(\frac{Mz_0}{EI} \right)^{-p} (1-D)^q dD \quad (5)$$

式中: $a = a^* E^p$; M 为断面上荷载弯矩; $\bar{I}$ 为损伤过程中断面的等效弯曲刚度:

$$\bar{I} = bz_0^3 \left[\int_0^1 (1-t)^2 (1-D) dt + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\xi_0} - 1 \right)^3 \right] \quad (6)$$

式中: $t = \xi / \xi_0$, $\xi = z / h$, $\xi_0 = z_0 / h$; b 、 h 分别为试件宽度、高度。

$$\text{记 } \sigma_0^* = \frac{M \cdot \frac{1}{2}h}{I_0} = \frac{6M}{Ebh^3}, \quad I_0 = \frac{1}{12}bh^3, \quad \text{则:}$$

$$N_{cr} = \int_0^1 \frac{1}{a} \left(\frac{\sigma_0^* z_0 I_0}{EI \cdot \frac{1}{2}h} \right)^{-p} (1-D)^q dD = \left[\int_0^1 \frac{1}{a(2\xi_0)^p} \left(\frac{I_0}{\bar{I}} \right)^{-p} (1-D)^q dD \right] \left(\frac{\sigma_0^*}{E} \right)^{-p} \quad (7)$$

将式(7)简写为:

$$N_{cr} = C \cdot (\sigma_0^*)^{-p} \quad (8)$$

其中:

$$C = E^p \left[\int_0^1 \frac{1}{a(2\xi_0)^p} \left(\frac{I_0}{\bar{I}} \right)^{-p} (1-D)^q dD \right] \quad (9)$$

式(8)与式(1)疲劳方程形式完全相同,说明由所提非线性疲劳损伤演化方程式(2)可反映试件的疲劳过程,并经比较可计算得到有关的疲劳损伤特征参数 p 、 a 在 $q=0$ 时为:

$$p = 3.24, \quad a = 3.519 \times 10^{-5} \quad (10)$$

3 疲劳损伤破坏演化过程模拟分析

3.1 疲劳损伤演化过程的有限元仿真分析方法

下面采用文献[21]所用的基于疲劳损伤理论的有限元方法计算分析 APA 试件疲劳损伤开裂及断裂过程。

根据 APA 试验分别取 5 种集中荷载,即 $P_0 = 50\text{kg}$ 、 $P_0 = 70\text{kg}$ 、 $P_0 = 90\text{kg}$ 、 $P_0 = 100\text{kg}$ 、 $P_0 = 110\text{kg}$ 。

有限元网格划分为 810 个八节点等参单元, 共 2569 个节点。计算模型如图 3 所示。其中试件两端滑动约束高度由各种条件组合情形的有限元计算确定, 其值基本上为 1.5cm, 仅有约 0.2cm 范围内的波动。经过试算对比, 选定计算过程中损伤变量 D 的增量步长为 0.02。

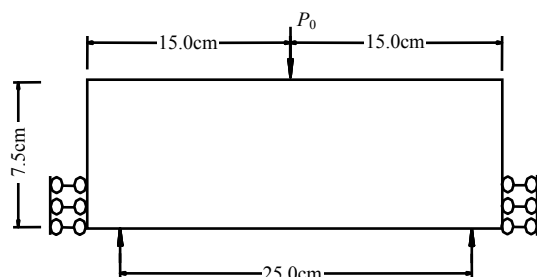


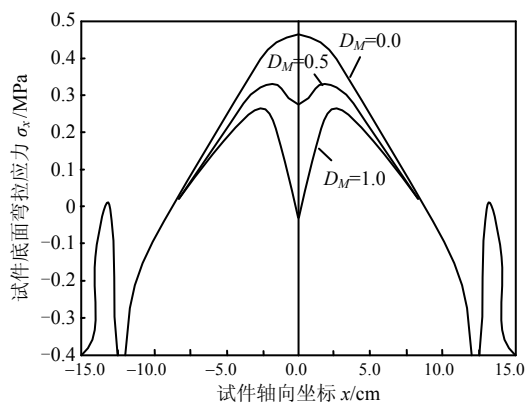
图 3 APA 试件计算模型

Fig.3 Model used to calculate for APA specimen

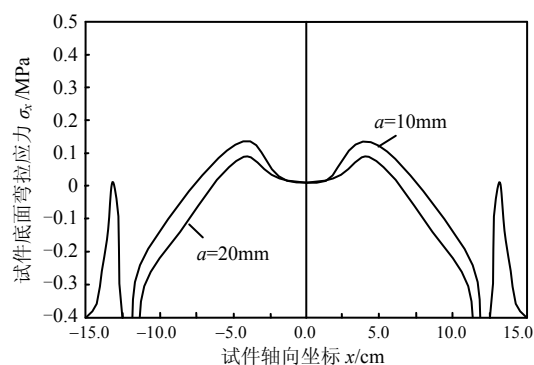
3.2 无筋试件疲劳损伤分析

3.2.1 弯拉应力

图 4(a)为 APA 梁式试件开裂前其底面弯拉应力分布随疲劳荷载作用(跨中底面 M 点损伤变量 D_M 值的增大)的变化过程。图 4(a)中曲线反映出, 随着疲劳损伤的发展, 梁式试件底面产生最大弯拉应力的位置逐渐地从跨中向两侧转移, 当 M 点的损伤值 $D_M=1.0$ 时, 最大弯拉应力点的位置距跨中 M 点约为 2.5cm。并且, 梁式试件底面最大弯拉应力值也由 0.44MPa 降低为 0.25MPa。与此同时, M 点的弯拉应力由最大值逐渐衰减, 直至 $D_M=1.0$ 时变为零值。这一过程在图 5 中清楚地体现出来, 其衰减的速度随损伤的加剧而加快。图 4(b)中曲线说明, 随着梁式试件跨中底面开裂和裂纹扩展, 梁式试件底面的最大弯拉应力进一步降低, 但其位置基本稳定在距跨中 M 点约 4.0cm 处, 并且裂纹两侧零应力区至 1.0cm 多宽。此外, 在梁底面支点附近区域存在着压应力跳变(应力集中)现象。



(a) 开裂前



(b) 开裂后

图 4 APA 梁式试件底面弯拉应力分布($P_0=100\text{kg}$)

Fig.4 Distribution of bending stresses in the bottom of APA specimen ($P_0=100\text{kg}$)

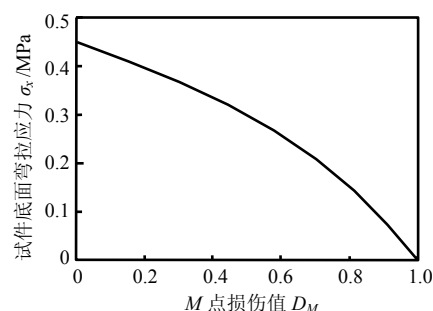
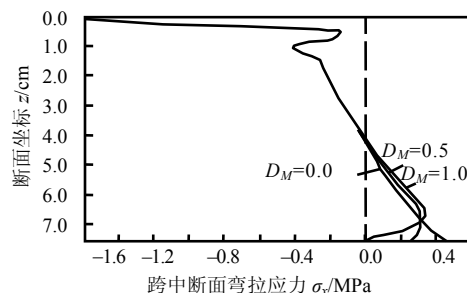


图 5 APA 梁式试件跨中 M 点弯拉应力随损伤的变化 ($P_0=100\text{kg}$)

Fig.5 Change of bending stress at M point of middle span with damage ($P_0=100\text{kg}$)

图 6 表明, 在出现损伤前, 跨中断面大部分截面弯拉应力几乎呈线性, 只是在梁式试件顶面集中荷载作用区附近出现异常现象, 即压应力急剧增大。这与集中荷载区的应力集中现象有关。这一影响一直存在于损伤、开裂全过程。随着梁底面产生损伤, M 点的弯拉应力逐渐减小, 断面上产生最大弯拉应力 σ_{x1} 的位置逐渐向上转移。并且, 当开裂以后, 由于有效断面减小, 弯拉刚度降低, 在跨中断面上产生的最大弯拉应力和压应力均增大。在裂纹出现、扩展全过程中, 拉压分区点位置逐渐向上发展。

由于 APA 梁式试件两端局部受到约束, 这一约束力体现为对向的压力, 随着裂纹的继续扩展,



(a) 开裂前

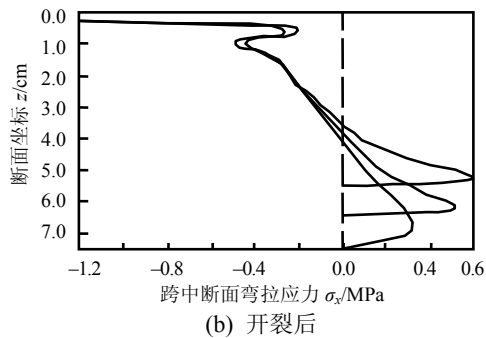


图 6 跨中断面弯拉应力分布(无筋试件: $P_0=100\text{kg}$)

Fig.6 Distribution of bending stresses in the middle section (unreinforced: $P_0=100\text{kg}$)

APA 梁式试件将表现出拱的效应,即裂纹扩展到一定长度后,裂纹所在跨中断面的未开裂区将只受压应力作用,无拉应力存在。随着裂纹的继续扩展,跨中断面上的最大弯拉应力 σ_{x1} 达到最大值后又下降至零值。这一过程在图 7 中清楚地体现出来,有限元计算表明,当裂纹长度 a 扩展至约 20mm 时,跨中断面上的最大弯拉应力 σ_{x1} 达到最大值 0.6MPa,此后,最大弯拉应力值 σ_{x1} 将降低,当裂纹长度大约为 54mm 时,它降至零值。而另一方面,梁两端侧面仅受压力作用,受压区在侧面下部约 1.5cm 范围,最大压力值 σ_{x2} 随着裂纹的扩展逐渐增大,然后趋于稳定(见图 8)。

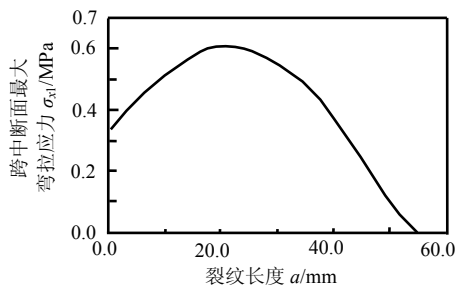


图 7 跨中断面最大弯拉应力 σ_{x1} 随裂纹扩展的变化 (无筋试件: $P_0=100\text{kg}$)

Fig.7 Change of the maximum bending stress σ_{x1} in the middle section with crack spreading (unreinforced: $P_0=100\text{kg}$)

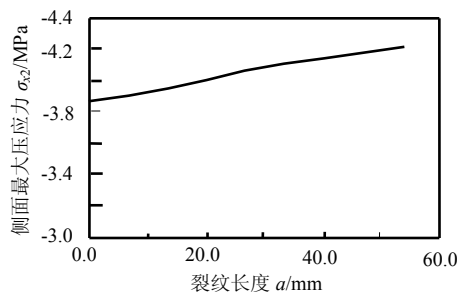


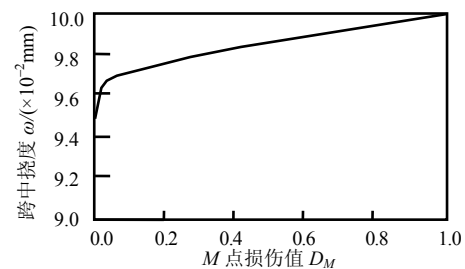
图 8 两端侧面最大压应力 σ_{x2} 随裂纹长度的变化 (无筋试件: $P_0=100\text{kg}$)

Fig.8 Change of the maximum pressure stress σ_{x2} in the both end surfaces with crack length (unreinforced: $P_0=100\text{kg}$)

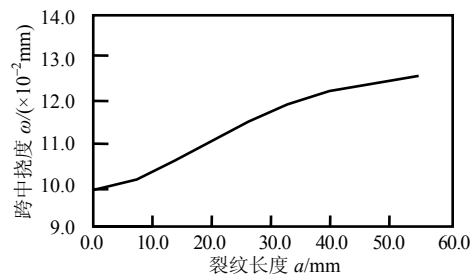
3.2.2 梁的挠度

在梁底面开裂前,梁的跨中挠度随着疲劳损伤的发展而增大,但增大的速度在初期有一急剧增加现象,然后逐渐趋缓(见图 9(a))。这是由于当梁开始出现损伤时,损伤区主要在跨中,对该处弯拉刚度影响较大;随着损伤的进一步加深,损伤区范围扩大,受损区弯拉刚度降低对梁跨中挠度的影响趋于平缓。

当梁底面开裂后,跨中挠度随着裂纹的扩展增大,且增大的速度逐渐加剧;当裂纹长度达到约 20mm 后开始逐渐趋于减缓;当裂纹长度达到约 40mm 后,逐渐趋于平缓稳定,这一现象与前述的拱效应相关(见图 9(b))。这一现象也体现在梁的挠度与循环加载次数的关系中(见图 10)。图 10 所显示的梁挠度随循环加载变化的规律与图 3 试验结果相一致。



(a) 开裂前



(b) 开裂后

图 9 跨中挠度随损伤、开裂的变化(无筋试件: $P_0=100\text{kg}$)

Fig.9 Change of displacement of middle span with damage and cracking (unreinforced: $P_0=100\text{kg}$)

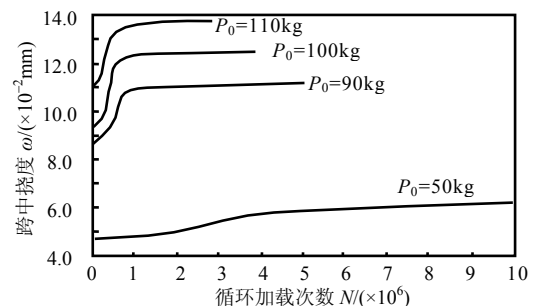


图 10 跨中挠度随循环加载次数的变化(无筋试件)

Fig.10 Changes of displacements of middle span with cycling loads (unreinforced)

3.2.3 疲劳损伤寿命

图 11 表明,在试件底面开裂前,根据有限元方法仿真计算结果绘制的疲劳曲线(即疲劳寿命与循环荷载应力关系曲线)与试验曲线非常接近。表 3 中数据表明,二者最大误差在 12.0%以内。而疲劳寿命预估误差在 30%以内,均是可以接受的^[22]。

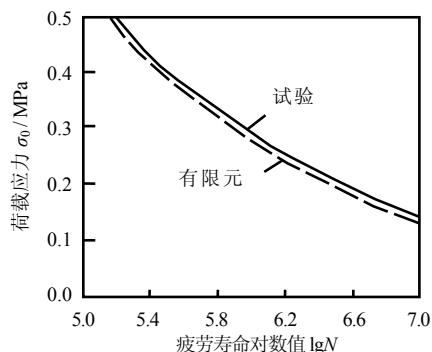


图 11 疲劳曲线(无筋试件)

Fig.11 Fatigue life curve (unreinforced)

表 3 有限元方法与试验回归的疲劳寿命比较(无筋试件)

Table 3 Comparison between fatigue lives obtained by FEM and test (unreinforced)

方法	荷载 P_0/kg				
	50	70	90	100	110
有限元法	2095000	704300	312000	221800	162800
试验回归	2379887	800021	354384	251895	184972
相对误差/(%)	-12.0	-12.0	-12.0	-11.9	-12.0

当试件底面开裂后,图 12 表明,在同一裂纹长度时,所施加荷载 P_0 大,则疲劳寿命短;当裂纹长度达到约 40mm 后,疲劳寿命有一增大趋势。这是前述的拱效应所导致的结果。由于本文只考虑沥青混合料受拉剪损伤,而未考虑受压损伤,故当跨中断面处于受压状态时,APA 梁式试件将不会再发生裂纹扩展,呈现出裂纹停滞扩展现象,在荷载 P_0 的继续作用下,APA 试件不会出现失稳现象。结合

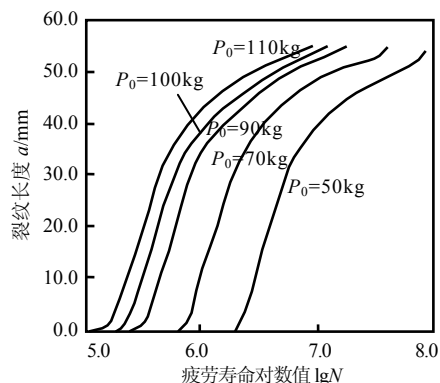


图 12 裂纹长度随循环加载次数的变化(无筋试件)

Fig.12 Change of crack length with cycling loads (Unreinforced)

前面梁的挠度分析和试验结果,若以裂纹长度为 25mm 作为裂纹扩展与稳定(停止试验)分界,则表 4 中数据表明,开裂后疲劳寿命比产生裂纹时的延长约 1.22 倍。

表 4 开裂前后疲劳寿命比较(无筋试件)

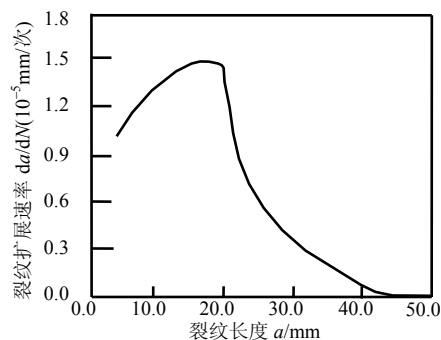
Table 4 Comparison between Fatigue lives before and after cracking (unreinforced)

阶段	荷载 P_0/kg				
	50	70	90	100	110
开裂时 N_{cr}	2095000	704300	312000	221800	162800
稳定时 N_f	4643000	1561000	691400	491400	360900
N_f/N_{cr}	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22

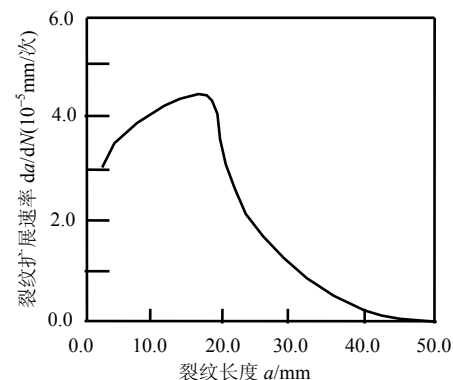
3.2.4 裂纹扩展速率

根据不同荷载 P_0 下 APA 弯曲梁式试件疲劳损伤开裂、断裂过程的有限元计算,可以求出不同荷载 P_0 、不同裂纹长度时的裂纹扩展速率。有关结果如图 13 所示。

图 13 中曲线表明,在裂纹扩展初期,随着裂纹长度的延伸,裂纹扩展速率逐渐增加;当裂纹扩展至约 20mm 以后呈现出急剧降低趋势;当裂纹长度达到 40mm~50mm 后,裂纹扩展速率几乎降低至零值。这一结果与根据梁的挠度、疲劳寿命和裂纹长度关系推测结果以及试验记录相一致。并且,对于同一裂纹长度,荷载较大时,其裂纹扩展速率相应大些。



(a) $P_0=50\text{kg}$



(b) $P_0=70\text{kg}$

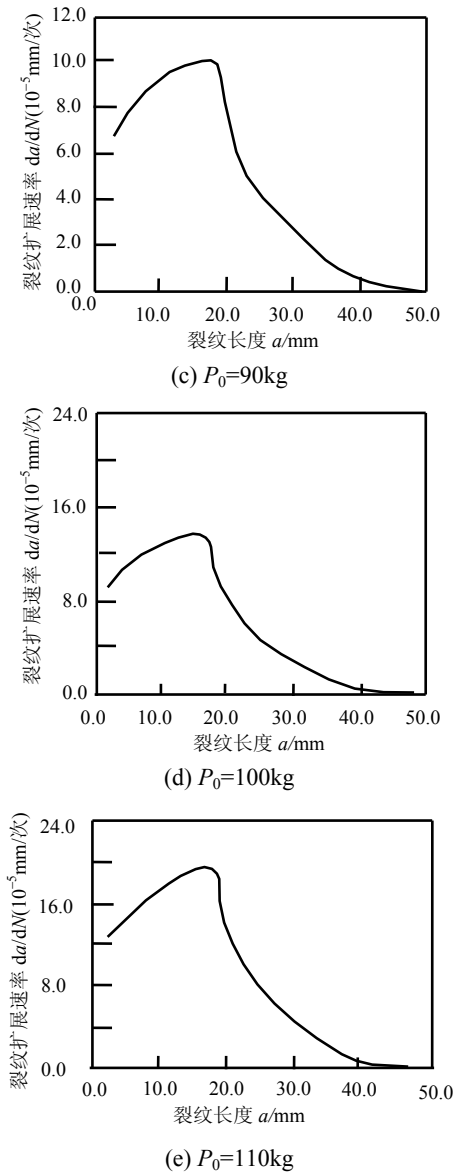


图 13 裂纹扩展速率与裂纹长度关系

Fig.13 Relation between crack spreading velocity and crack length

3.2.5 Paris 公式参数

在疲劳裂纹扩展分析中经常采用 Paris 公式(式(11))预测其扩展寿命。针对本文所分析的 APA 弯曲梁式试件,根据前节关于裂纹扩展速率的有限元计算结果,下面将计算回归 Paris 公式中的参数 A 、 n 。

$$da / dN = A(K)^n \tag{11}$$

其中: 裂纹扩展速率 da / dN 的单位为 mm/次; 应力强度因子 K 的单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

为此,首先计算各个荷载下不同裂纹长度时的 I 型应力强度因子 K 。利用有限元计算出 $P_0=100\text{kg}$ 时 APA 梁式试件的裂纹应力强度因子见表 5。

表 5 APA 梁式试件裂纹应力强度因子

Table 5 Stress intensity factors (SIF) of crack in APA specimen

裂纹长度/mm	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
应力强度因子/ ($\text{kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	67.4	77.4	81.7	81.4	77.3	69.4	58.0	43.4	25.8	5.0

表 5 中数据表明,由于前述的 APA 梁式试件存在拱效应,当裂纹长度达到 15mm~20mm 时,裂纹应力强度因子达到最大值,然后逐渐降低,当裂纹长度达到约 50mm 时,趋于零值。若按照 Paris 公式或其它类似公式所描述的疲劳裂纹扩展速率变化规律,则根据裂纹应力强度因子的变化,可以发现,在裂纹扩展初期,较高的裂纹应力强度因子会导致较高的裂纹扩展速率;而随着裂纹长度扩展至 15mm~20mm 后,由于裂纹扩展驱动力-裂纹应力强度因子的降低,裂纹扩展速率逐渐降低;当裂纹长度达到约 50mm 时,由于应力强度因子趋于零值,则裂纹长度不会因为荷载的继续施加而变化,趋于稳定不扩展状态。

根据表 5 中 $P_0=100\text{kg}$ 时的裂纹应力强度因子值绘出此时应力强度因子与裂纹长度关系曲线,如图 14 所示。可以依据此关系曲线,查得除表 5 以外其它裂纹长度所对应的裂纹应力强度因子值。然后根据线弹性理论,按照荷载比计算出其它荷载下裂纹应力强度因子值。

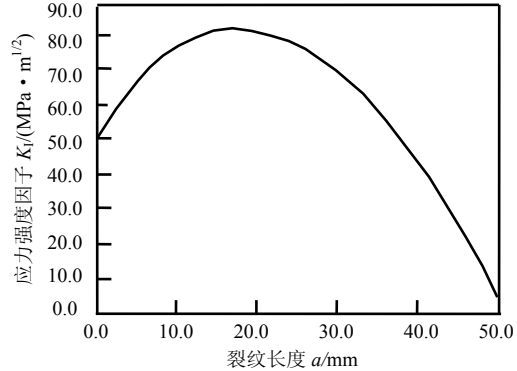


图 14 $P_0=100\text{kg}$ 时裂纹应力强度因子与裂纹长度关系

Fig.14 Relation between SIF and crack lenth as $P_0=100\text{kg}$

考虑到裂纹扩展前期和末期裂纹扩展速率与应力强度因子关系与裂纹稳定扩展期有所差异,因此剔除扩展前后必要的的数据,采用双对数坐标下的最小二乘法回归计算出 Paris 公式(式(11))中的疲劳断裂参数: $A=2.801 \times 10^{-9}$, $n=2.269$, 相关系数=0.91。结果表明,在 APA 试件裂纹扩展阶段,裂纹扩展速率与应力强度因子具有良好的双对数线性关系,可以采用 Paris 公式预测裂纹扩展寿命。

3.3 加筋试件疲劳损伤分析

APA 弯曲疲劳试验结果表明,在梁式试件底部(受拉区)布置土工布、玻璃纤维格栅等加筋材料可以改善沥青混合料试件的抗疲劳开裂性能。为了阐明这一作用机理,本节利用薄膜单元(模拟筋材)和界面单元(模拟层间相互作用),对加筋试件进行弯曲疲劳损伤分析。

计算条件为:计算荷载 $P_0=100\text{kg}$;界面单元弹性系数 $K_{s1}=K_{s2}=10^6\text{MPa/m}$;加筋材料张拉模量 $E_g=0.1\text{MN/m}$ 、 $E_g=0.3\text{MN/m}$ 、 $E_g=0.5\text{MN/m}$ 、 $E_g=0.7\text{MN/m}$ 、 $E_g=1.0\text{MN/m}$ 。

3.3.1 弯拉应力

根据有限元计算结果,在同样荷载下加筋试件底面弯拉应力数值及其分布规律基本与无筋试件的一致。区别在于开裂断面(跨中断面)弯拉应力有所不同。

图 15 为 $E_g=1.0\text{MN/m}$ 时跨中裂纹扩展过程中试件断面上弯拉应力分布规律的变化。与图 6 中同样荷载下未加筋试件的试验结果相比较,结果表明,在试件底部裂纹未穿过埋深 1.5cm 处加筋材料前,加筋与未加筋两种情形下试件跨中断面上弯拉应力分布规律基本一致,只在加筋位置弯拉应力存在间断,而加筋层上部的沥青混合料层底应力降低,在裂纹扩展初期,这种间断几乎难以区别,只有当裂纹扩展接近加筋材料,间断逐渐明显,此时加筋材料能发挥较明显的加筋作用;当裂纹穿过加筋材料后,由于筋材的桥联效应,降低了断面上未开裂部分的弯拉应力。

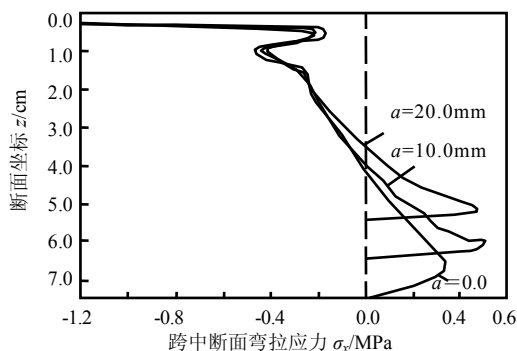


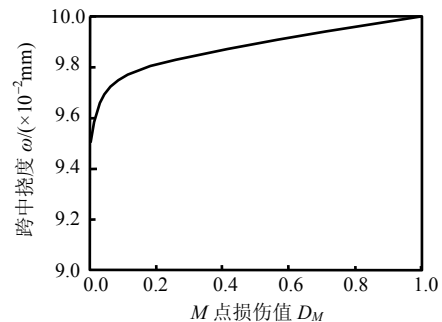
图 15 跨中断面弯拉应力分布(加筋试件: $P_0=100\text{kg}$)

Fig.15 Distribution of bending stresses in the middle section (reinforced: $P_0=100\text{kg}$)

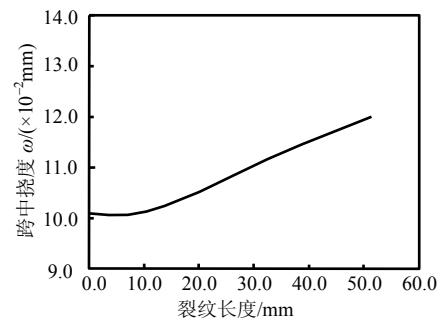
3.3.2 梁的挠度

图 16 所示的加筋试件梁跨中挠度在梁底面开裂前后的变化规律与图 9 所示的无筋试件的类似。与无筋试件相比较,在梁底面开裂前,加筋试

件与无筋试件二者的挠度无甚差别,但一旦开裂后,加筋材料的桥联效应改善了开裂断面的受力状态,提高了其弯拉刚度,从而降低了梁的挠度。



(a) 开裂前



(b) 开裂后

图 16 跨中挠度随损伤、开裂的变化(加筋试件: $P_0=100\text{kg}$)

Fig.16 Change of displacement of middle span with damage and cracking (reinforced: $P_0=100\text{kg}$)

图 17 所示的加筋试件梁跨中挠度随循环加载次数的变化规律与图 2 所示的试验结果相一致。

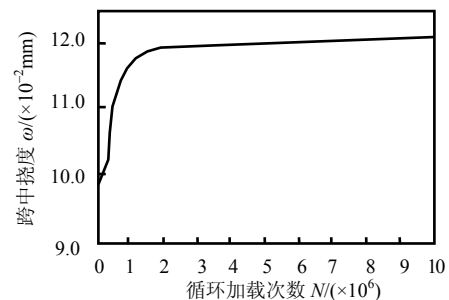


图 17 跨中挠度随循环加载次数的变化(加筋试件)

Fig.17 Change of displacement of middle span with cycling loads (reinforced)

3.3.3 疲劳损伤寿命

图 18 表明,在梁式试件底层埋设的筋材的确可以延长试件的疲劳寿命,其延长寿命效果随着裂纹的扩展而增强。计算不同裂纹长度下加筋试件所承受的循环加载次数 N 与无筋试件所承受的循环加载次数 N_0 的比值 $f=N/N_0$,并将有关的结果绘制在图 19 中。结果表明该比值随着筋材张拉模量 E_g 和裂纹长度 a 而变化,最大值可达到 2.14,其值与试

验结果(表 2)相近。筋材张拉模量越低,则延长寿命效果越差。为了真正起到加筋而延长沥青混合料试件寿命的作用,应保证加筋材料的张拉模量不能低于某一定值。

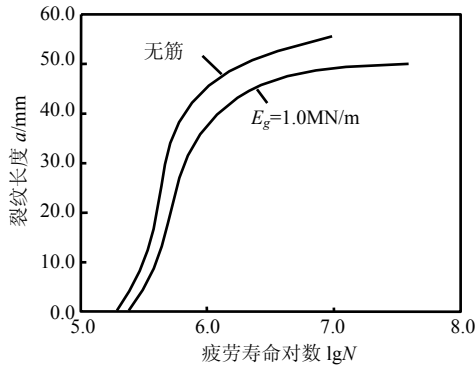


图 18 疲劳曲线(加筋试件)

Fig.18 Fatigue life curve (reinforced)

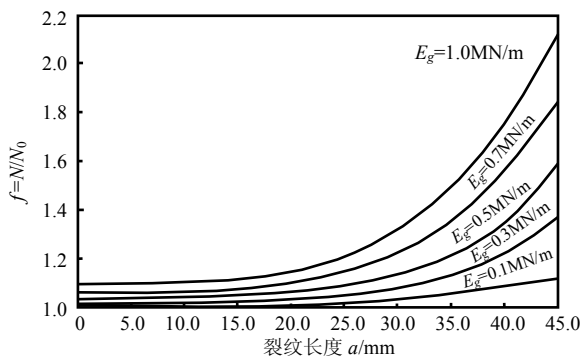


图 19 裂纹长度随循环加载次数的变化(加筋试件)

Fig.19 Change of crack length with cycling loads (reinforced)

3.3.4 加筋材料拉力

图 20 所示的加筋试件($E_g=1.0\text{MN/m}$)在开裂前和断裂破坏时的加筋材料拉力分布曲线表明,在试件开裂前加筋材料所受拉力很小,一旦开裂后,其最大拉力逐渐增加,断裂破坏时最大可达 4.5kN/m 。并且,加筋材料所受拉力主要集中在裂纹尖端两侧约 2.0cm 范围内。为了进一步阐述加筋材料的拉力变化,绘出其裂纹处的最大拉力随裂纹长度的变化曲线,如图 21 所示。其中曲线表明,在裂纹扩展至加筋材料层位前,筋材的最大拉力变化不显著,处于逐渐增加状态;当裂纹穿过筋材进入试件上部沥青混合料层的初期,这一变化趋势仍维持一段时间,这可能与裂纹穿过筋材时释放应力有关;当裂纹长度扩展至约 17.5mm 时,筋材最大拉力呈现出急剧增大势头;当裂纹长度达到 20mm 后,又进入逐渐增大阶段。这说明,对于 APA 这种两端存在约束的试件,加筋材料的作用主要集中在裂纹穿过筋材后,并且随着裂纹进入停止扩展状态,加筋材

料的桥联作用将处于稳定发挥阶段。正是由于加筋材料的桥联作用,沥青混合料试件的疲劳寿命得到了改善。

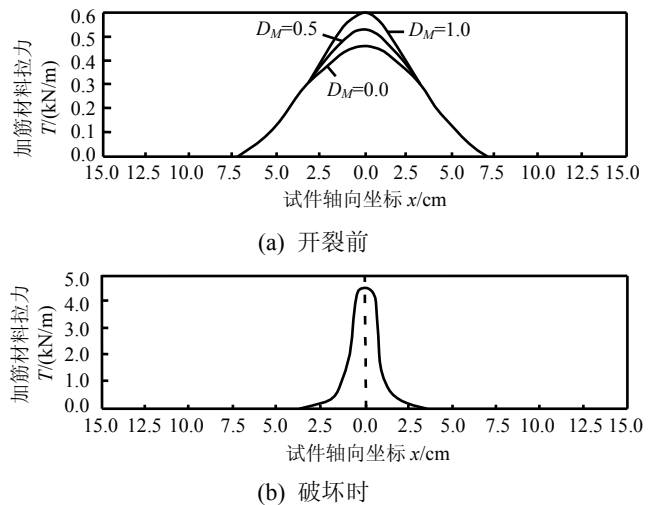


图 20 加筋材料的拉力分布

Fig.20 Distribution of tension force in reinforcement

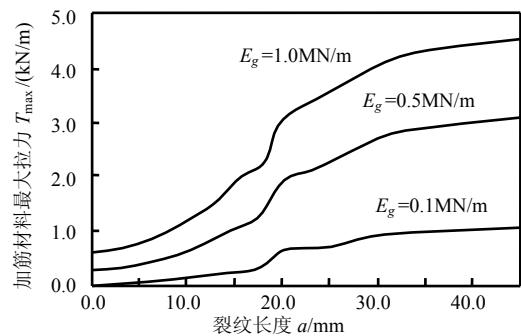


图 21 加筋材料最大拉力随裂纹长度的变化

Fig.21 Change of maximum tension in reinforcement with crack length

4 结论

(1) 应用沥青路面分析仪(APA)对沥青混凝土梁式试件进行往返轮载疲劳试验,试验结果表明,这些土工布、玻璃纤维格栅加筋措施能显著提高沥青混凝土梁式试件的疲劳寿命。

(2) 针对以往研究中关于损伤值计算中存在的缺陷,采用反分析方法提出了沥青混合料非线性疲劳损伤演化模型,由此推导论证了开裂时试件理论疲劳方程与疲劳试验所得疲劳方程形式具有一致性,并结合疲劳试验结果,确定了疲劳损伤模型中的特征参数。

(3) 根据所建立的疲劳损伤演化模型及确定的疲劳损伤特征参数,采用损伤力学有限元方法,模拟计算 APA 梁式试件的疲劳损伤断裂过程,分析了试件疲劳损伤过程中的弯拉应力、跨中位移、损

伤变量、裂纹扩展速率等的变化规律,预测沥青混合料试件失稳断裂时的裂纹长度,并比较加筋材料的加筋效果。试件跨中挠度、疲劳寿命的数值模拟结果与试验结果吻合较好,进一步证明了所提出的沥青混合料疲劳损伤演化模型的合理有效性。

(4) 模拟计算表明,由于 APA 梁式试件两侧底部存在约束,在试件内呈现出拱形受力效应,这导致 APA 试件断裂现象不显著。

(5) 关于疲劳裂纹形成阶段和扩展阶段的疲劳寿命分析指出,对于 APA 弯曲梁试件,其疲劳裂纹扩展阶段的疲劳寿命约为裂纹形成阶段的疲劳寿命的两倍;疲劳裂纹扩展主要表现为稳定扩展,可以运用 Paris 公式描述疲劳裂纹稳定扩展阶段,并回归得到了有关的疲劳断裂参数。

参考文献:

- [1] Turatsinze A, Granju J L, Sabathier V, Farhat H. Durability of bonded cement-based overlays: Effect of metal fibre reinforcement [J]. *Materials and Structures*, 2005, 38: 321—327.
- [2] Tran Q T, Toumi A, Granju J L. Experimental and numerical investigation of the debonding interface between an old concrete and an overlay [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39: 379—389.
- [3] 廖卫东, 王小雄. 沥青加铺层抗反射裂缝足尺疲劳试验[J]. *长安大学学报*, 2006, 26(5): 9—12.
Liao Weidong, Wang Xiaoxiong. Full-scale-fatigue test on anti-reflective cracking of asphalt overlay [J]. *Journal of Chang'an University*, 2006, 26(5): 9—12. (in Chinese)
- [4] 杨斌, 陈拴发, 王秉纲. 水泥混凝土路面沥青加铺层足尺疲劳破坏试验[J]. *中外公路*, 2007, 27(1): 155—158.
Yang Bin, Chen Shuanfa, Wang Binggang. Full scale fatigue breaking test on asphalt mixture overlay on cement concrete pavement [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2007, 27(1): 155—158. (in Chinese)
- [5] Fabien Perez, Benoit Bissonnette, Richard Gagne. Parameters affecting the debonding risk of bonded overlays used on reinforced concrete slab subjected to flexural loading [J]. *Materials and Structures*, 2009, 42: 645—662.
- [6] 李善强, 王选仓. 沥青加铺层反射裂缝发展疲劳模拟试验研究[J]. *中外公路*, 2009, 29(2): 190—193.
Li Shanqiang, Wang Xuancang. Research on the fatigue development of reflective crack in asphalt mixture overlay by simulating test [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2009, 29(2): 190—193. (in Chinese)
- [7] Hema Siriwardane, Raj Gondle, Bora Kutuk. Analysis of flexible pavements reinforced with geogrids. *Geotech [J]. Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28: 287—297.
- [8] 周志刚, 谢军, 崔鹏. 加筋沥青混凝土梁式试件的 APA 弯曲疲劳试验研究[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(3): 24—27.
Zhou Zhigang, Xie Jun, Cui Pen. Analysis of the reinforced asphalt concrete beam specimen with repeated bending test by APA [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(3): 24—27. (in Chinese)
- [9] 葛折圣, 黄晓明. 运用损伤力学理论预测沥青混合料的疲劳性能[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(1): 40—42.
Ge Zhesheng, Huang Xiaoming. Prediction of asphalt mixtures fatigue properties using damage mechanics [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(1): 40—42. (in Chinese)
- [10] 朱洪洲, 黄晓明. 一种新的沥青混合料疲劳性能评价方法[J]. *公路交通科技*, 2005, 22(2): 5—7.
Zhu Hongzhou, Huang Xiaoming. Fatigue model of asphalt mixtures based on damage theory [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(2): 5—7. (in Chinese)
- [11] 仰建岗, 王秉纲, 陈拴发. 基于修正 Neuber 方程的沥青路面裂缝形成疲劳寿命预估方法[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(2): 50—54.
Yang Jiangang, Wang Binggang, Chen Shuanfa. Estimating method of fatigue life during cracking initiation of asphalt pavement based on modified Neuber equation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(2): 50—54. (in Chinese)
- [12] 吴旷怀, 张肖宁. 沥青混合料疲劳损伤非线性演化统一模型试验研究[J]. *公路*, 2007, 5: 125—129.
Wu Kuanghuai, Zhang Xiaoning. Experimental research on uniform model for nonlinear evolution equation of fatigue damage of asphalt mixture [J]. *Highway*, 2007, 5: 125—129. (in Chinese)
- [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—27.
Zheng Jianlong, Lu Songtao. Nonlinear fatigue damage model for asphalt mixtures [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(5): 21—27. (in Chinese)
- [14] 周晓青, 李宇峙, 应荣华, 邵腊庚, 孙立军. 沥青混合料拉伸疲劳试验下疲劳损伤特性研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(5): 47—51.
Zhou Xiaoqing, Li Yuzhi, Ying Ronghua, Shao Lageng, Sun Lijun. Research on the fatigue and damage characteristics of asphalt mixture based on uniaxial fatigue tension testing at low temperature [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005, 27(5): 47—51. (in Chinese)
- [15] Maria Castro, Sanchez Jose A. Damage based model for prediction of asphalt concrete fatigue curves [J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, 2007, 19(8): 700—702.

- [16] Sudip Bhattacharjee, Rajib B. Mallick, Jo Sias Daniel. Small scale accelerated pavement testing in the laboratory for the fatigue characterization of hot mix asphalt [C]. Pavements and Materials 2008: Modeling, Testing, and Performance, Proceedings of the Symposium on Pavement Mechanics and Materials at the Inaugural International Conference of the Engineering Mechanics Institute, 2008.
- [17] 关宏信, 郑健龙, 张起森. 沥青混合料的粘弹性疲劳损伤模型研究[J]. 力学与实践, 2007, 29(2): 50—53.
Guan Hongxin, Zheng Jianlong, Zhang Qisen. Viscoelastic fatigue damage model of bituminous mixture [J]. Mechanics and Practice, 2007, 29(2): 50—53. (in Chinese)
- [18] 吴旷怀, 杨国良, 张肖宁. 考虑松弛的沥青混合料疲劳损伤累计模型研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2008, 25(4): 345—350.
Wu Kuanghuai, Yang Guoliang, Zhang Xiaoning. A fatigue damage model of asphalt mixture considering stress relaxation [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2008, 25(4): 345—350. (in Chinese)
- [19] 关宏信, 郑健龙. 沥青路面粘弹性疲劳损伤分析[J]. 湖南科技大学学报, 2008, 23(3): 54—57.
Guan Hongxin, Zheng Jianlong. The viscoelastic fatigue damage developing of asphalt pavement [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2008, 23(3): 54—57. (in Chinese)
- [20] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 64—65.
Yu Shouwen, Feng Xiqiao. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 64—65. (in Chinese)
- [21] 周志刚. 交通荷载下沥青类路面疲劳损伤断裂研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
Zhou Zhigang. A research on the fatigue damage cracking in asphalt pavement under traffic load [D]. Changsha: Central South University, 2003. (in Chinese)
- [22] 张行, 赵军. 金属构件应用疲劳损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 128.
Zhang Xing, Zhao Jun. Applied fatigue damage mechanics of metallic structural members [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1998: 128. (in Chinese)

(上接第 165 页)

- [11] 范重. 正方形断面钢管混凝土短柱轴心受压极限承载力的研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 80—86.
Fan Zhong. Research on the ultimate load capability of the square concrete-filled steel tube stub columns under axial loading [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 80—86. (in Chinese)
- [12] Mander B J, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804—1826.
- [13] Susantha K A S, Ge H, Usami T. Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shape steel tubes [J]. Engineering Structures, 2001(23): 1331—1347.
- [14] Liang Q Q, Uy B. Theoretical study on the post-local buckling of steel plates in concrete-filled box columns [J]. Computer & Structures, 2000, 75: 475—490.
- [15] Bridge R Q, O'shea M D. Behaviour of thin-walled steel box sections with or without internal restraint [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47: 73—91.
- [16] Uy B, Bradford M A. Elastic local buckling of steel plates in composite steel-concrete members [J]. Engineering Structures, 1996(18): 193—200.
- [17] 唐家祥, 王仕统, 裴若娟. 结构稳定理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989: 240—325.
Tang Jiaxiang, Wang Shitong, Pei Ruojuan. The theory of structural stability [M]. Beijing: China Railway Press, 1989: 240—325. (in Chinese)
- [18] Chen Ji, Chen Haojun. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 590—626.
- [19] Wright H D. Buckling of plates in contact with rigid medium [J]. The Structural Engineering, 1993, 71(12): 209—215.
- [20] Wright H D. Local stability of filled and encased steel sections [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(10): 1382—1388.
- [21] Schneider S P. Axially loaded concrete-filled steel tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1125—1138.