

文章编号:1671-6833(2007)01-0083-04

沥青混合料应变-寿命疲劳方程研究

仰建岗^{1,2}, 王秉纲¹, 陈拴发¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 江西省交通科学研究所, 江西南昌 310000)

摘 要: 在国内外研究成果基础上, 提出了合理可行的沥青混合料直接拉伸疲劳试验中试件尺寸、失效判据、控制方式、加载频率和试验温度等条件。基于不同应变水平的疲劳试验结果, 分析了平均应力影响, 建立了沥青混合料应变-寿命疲劳方程, 可作为疲劳开裂寿命预估的依据, 并提出了沥青混合料疲劳开裂拉应变的阈值和极限值。利用沥青混合料直接拉伸疲劳试验得到的应变-寿命疲劳方程能更好体现沥青混合料的疲劳特征, 其疲劳开裂拉应变的阈值和极限值能充分反映沥青混合料疲劳破坏的过程。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 应变-寿命疲劳方程; 疲劳开裂

中图分类号: U 416. 01

文献标识码: A

0 引言

目前国内有关沥青混合料的疲劳试验大多是采用应力控制模式, 而国外大多采用应变控制模式。沥青混合料是粘弹性材料, 其模量随温度变化, 实测应力转换成应变的精确度较差, 应力-疲劳方程难以应用。同时, 若采用弯曲疲劳试验, 以小梁跨中挠度换算为底部弯拉应变作为控制指标^[1], 试验结果存在较大误差, 难以精确反映试件真实应变情况。而应变控制疲劳试验中沥青混合料的应力-应变状态更符合沥青路面的实际情况。作者采用轴向应变控制的直接拉伸试验, 进行不同应变水平的疲劳试验, 建立沥青混合料应变-寿命疲劳方程。

1 试验条件

试验设备采用有 TestStarII 数字式控制器和 MPT 动态测试软件的 MTS (Materials Test System) 电液伺服万能材料试验机。

根据试验规程^[2]和国内外相关研究成果, 确定试件为 50 mm × 50 mm × 250 mm 的棱柱体。试件按车辙试验板成型, 切割成小梁。沥青混合料采用 AC16 型。

为保证小梁试件在端部受到均匀、正中的拉应力, 在试件两端采用钢板粘结施加荷载, 同时在

主动加载端设置一个球形铰座。通过钢板传递荷载, 使小梁端部均匀受力; 施加拉力时, 球形铰座自动回正, 以保证小梁处于正中受拉状态, 避免偏心受拉现象。

根据沥青混合料特性及试验可操作性, 确定小梁试件失效采用荷载下降判据。目前国内外对沥青混合料尚无深入系统研究和可借鉴的成果, 因此, 参考相似材料的试验方法^[3], 确定荷载降为峰值荷载的 75% 时, 试件失效。

采用轴向应变控制模式, 加载波形为三角波, 高低应变比为 10。综合模拟效果、试验时间和夹具性能等因素, 确定试验加载频率为 2 Hz, 无间歇时间。

试验应变比为 0.6、0.5、0.4 和 0.3 四级水平, 每级应变水平采用 3 根试件。

试验温度为路面疲劳等效温度, 即 15 °C^[4]。

2 Mason - Coffin 公式

对于沥青混合料, 可采用目前广泛使用的 Mason - Coffin 公式^[3]来描述应变-寿命曲线:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \left(\frac{\sigma'_f}{E} \right) (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

式中: ε_a 为工作应变, 即荷载在材料中产生的应变值; $\Delta \varepsilon$ 为每次循环应变幅值; $\Delta \varepsilon_e, \Delta \varepsilon_p$ 为循环弹

收稿日期: 2006-09-19; 修订日期: 2006-11-09

作者简介: 仰建岗 (1979-), 男, 江西南昌人, 长安大学博士研究生, 主要从事路面工程方面的研究工作。

性和塑性应变幅值; $\sigma'_f, \varepsilon'_f$ 为疲劳强度系数和疲劳延性系数; E 为弹性模量,MPa; N_f 为疲劳寿命,次; b, c 为拟合参数.

在双对数坐标上, $\varepsilon_a - 2N_f$ 曲线可以分解为两条直线,如图 1 所示. 两条直线分别称为弹性线和塑性线,两线交点对应的寿命 $2N_f$ 为转变寿命,表示应变幅的弹性分量和塑性分量对寿命的贡献相同.

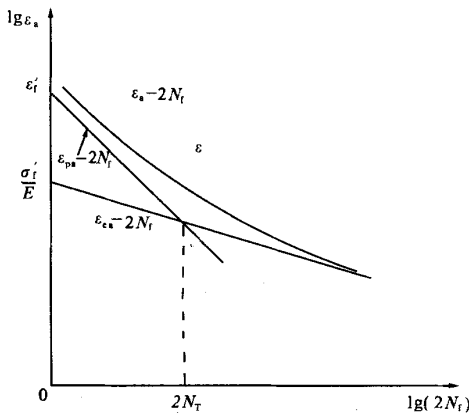


图 1 应变-寿命曲线

Fig.1 Strain-life curve

弹性线和塑性线可分别表达为:

弹性线

$$\varepsilon_{ea} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (2)$$

或

$$\lg \varepsilon_{ea} = \lg \frac{\sigma'_f}{E} + b \lg (2N_f) \quad (3)$$

塑性线

$$\varepsilon_{pa} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

或

$$\lg \varepsilon_{pa} = \lg \varepsilon'_f + c \lg (2N_f) \quad (5)$$

式中: ε_{ea} 为弹性工作应变; ε_{pa} 为塑性工作应变.

对于绝大多数材料的应变-寿命曲线, ε_a 在 0.2% ~ 2% 之间能充分描述材料的应变疲劳特性.

3 沥青混合料应变-寿命疲劳方程

拉伸速率为 1 mm/min 的单调拉伸试验结果表明, 沥青混合料极限拉应变的试验值为 0.009 1. 试验的控制应变量取应变水平为 0.3 ~ 0.6 倍的极限拉应变试验值, 试件长度为 250 mm. 表 1 列出各应变水平下最大应变和最小应变, 并给出试验控制的位移量.

上述公式中, 从数值上, σ'_f 约等于单调拉伸试验中的断裂应力 σ_f ; ε'_f 约等于单调拉伸试验中

表 1 试验控制应变量和位移量

Tab.1 Controlled strain and displacement of testing

应变比	0.3	0.4	0.5	0.6
最大应变	0.002 73	0.003 64	0.004 55	0.005 46
最大位移量/mm	0.683	0.910	1.138	1.365
最小应变	0.000 273	0.000 364	0.000 455	0.000 546
最小位移量/mm	0.068 3	0.091 0	0.113 8	0.136 5

的断裂应变 ε_f [5]. 表 2 列举了沥青混合料单调拉伸试验中 5 根小梁的断裂应变和断裂应力.

表 2 单调拉伸试验参数

Tab.2 Parameters of monotony tension testing

试件编号	断裂应变	断裂应力/MPa
D1	0.006 66	0.198 45
D2	0.010 33	0.242 36
D3	0.007 14	0.206 36
D4	0.010 78	0.220 67
D5	0.010 60	0.226 52
平均值	0.009 10	0.218 87

由表 2 可知, $\sigma'_f = 0.218 9$ MPa, $\varepsilon'_f = 0.009 1$.

通过 4 种应变水平的等应变疲劳试验, 根据雨流计数法对应力-时间历程进行疲劳寿命计算, 得到各应变水平下试件的疲劳作用次数, 见表 3.

表 3 应变幅和疲劳寿命

Tab.3 Strain amplitude and fatigue life

试件编号	S1	S2	S3	S4
$\varepsilon_a/10^{-3}$	2.424	1.945	2.019	2.017
$N_f/\text{次}$	45	50	519	513
试件编号	S5	S6	S7	S8
$\varepsilon_a/10^{-3}$	1.651	1.609	1.627	1.224
$N_f/\text{次}$	1 023	1 250	822	1 078

根据表 3, 采用 4 种常用的拟合算法对式(1)进行拟合, 结果见表 4.

表 4 中的四种拟合结果非常接近, 精度也基本相同. 因此, 可确定拟合参数 $b = 0.115 4$, $c = -0.221 8$.

将 b 和 c 代入式(1), 得

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^{0.115 4} + \varepsilon'_f (2N_f)^{-0.221 8} \quad (6)$$

若将 $\sigma'_f = 0.218 9$ MPa, $\varepsilon'_f = 0.009 1$ 代入式(6), 则得

$$\varepsilon_a = \frac{0.218 9}{E} \times (2N_f)^{0.115 4} + 0.009 1 \times (2N_f)^{-0.221 8} \quad (7)$$

表 4 不同拟合算法下的 b 和 c
Tab. 4 b and c of various regressive methods

拟合算法	麦夸特法 + 通用全局优化法	准牛顿法 + 通用全局优化法	改进差分进化算法	最大继承法
b	0.115 410	0.115 410	0.115 410	0.115 410
c	-0.221 822	-0.221 822	-0.221 822	-0.221 822
均方差/ 10^{-5}	3.360 185	3.360 185	3.360 185	3.360 185
残差平方和/ 10^{-9}	4.516 337	4.516 337	4.516 337	4.516 337
R^2	0.992 973	0.992 973	0.992 973	0.992 973
χ 系数/ 10^{-6}	1.247 997	1.247 997	1.247 997	1.247 997
F 统计	282.635 746	282.635 746	282.635 746	282.635 746
精度排序	4	3	2	1

说明:因各种算法之间差异非常小,限于篇幅,仅在精度排序中体现其差异.

式(7)即为沥青混合料应变 - 疲劳曲线方程. 根据此方程,可以由荷载作用下产生的应变,预估疲劳开裂的寿命.

3 平均应力修正

平均应力 σ_m 为循环加载过程的应力平均值,其影响取决于具体的荷载历程,仅次于应变幅值的影响,主要表现在局部应变的弹性分量部位. 计算表明,通常平均应力对寿命预测的影响不超过一倍. 由于压缩平均应力可提高疲劳抗力,因此当存在压缩应力且小于材料压缩屈服极限时,应不考虑其影响,即认为 $\sigma_m = 0$.

修正平均应力影响的方法有弹性线截距修正(Morrow 修正)^[6]和弹性线曲率修正^[7]. 两种修正方法的基本出发点均认为平均应力的影响主要在弹性部分;对塑性部分,则认为由于应力松弛,平均应力影响不大.

弹性线截距修正:在应变寿命曲线上,塑性线不变,弹性线的截距减小即向下平移,但斜率不变. 按 Goodman 直线等寿命图,当存在平均应力 σ_m 时,当量弹性应力幅为

$$\sigma_{eq} = \sigma_{ea} / (1 - \sigma_m / \sigma'_t) \tag{8}$$

继续推导可得

$$\varepsilon_a = \frac{(\sigma'_t - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_t (2N_f)^c \tag{9}$$

弹性线曲率修正是对弹性线的斜率进行修正,使之变成一条弯曲的曲线,而不再是直线.

设当量弹性应力幅为: $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{ea}(\sigma_{ea} + \sigma_m)}$,继续推导可得

$$\varepsilon_a = \frac{\sqrt{\sigma_m^2 + 4\sigma_{ea}^2} (2N_f)^{2b} - \sigma_m + \varepsilon'_t (2N_f)^c}{2E} \tag{10}$$

根据沥青混合料循环不同应变水平的应力 - 应变循环,计算得出各个试件的 σ_m 平均值都小
万方数据

于 0,详见表 5.

表 5 各应变水平的平均应力 σ_m
Tab. 5 Average stress σ_m with various strain levels

应变水平	0.6	0.5	0.4	0.3
σ_m /MPa	-0.012	-0.063	-0.060	-0.004

图 2 所示为应变水平为 0.6 时,在疲劳寿命内,每次应力应变循环的平均应力 σ_m 随循环次数的分布. 图中大部分循环的平均应力 σ_m 都小于 0,各应变水平的 σ_m 分布规律与此图基本相同.

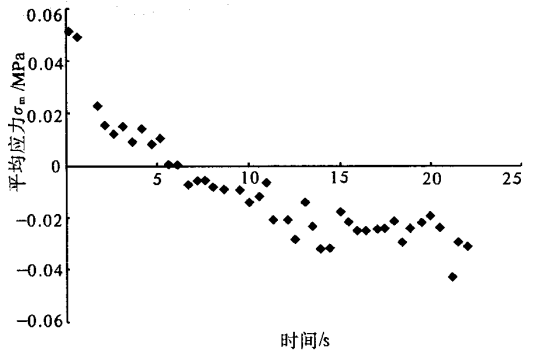


图 2 平均应力 σ_m 分布
Fig. 2 Attribution of average stress σ_m

各应变水平下疲劳寿命内 σ_m 的平均值都小于 0,且约 80% 的疲劳寿命内的 σ_m 都小于 0,因此,可认为沥青混合料的各应变水平的 σ_m 都为压缩应力,也即对于应变 - 寿命曲线的平均应力修正中,取 $\sigma_m = 0$,即不考虑平均应力的影响.

4 开裂阈值与极限值

根据式(7)计算当 $\varepsilon_a > 0.008\ 01$ 时, $N_f < 1$,与单调直接拉伸试验测得极限拉应变为 0.009 10 相差不大.

为直观表现出 $\varepsilon_a - N_f$ 之间的关系,取横坐标为 $\lg \varepsilon_a$,纵坐标为 $\lg N_f$,对 ε_a 在 $0 \sim 0.01$ 范围分 1 000 步进行隐函数作图,以表现两者之间关系,见图 3.

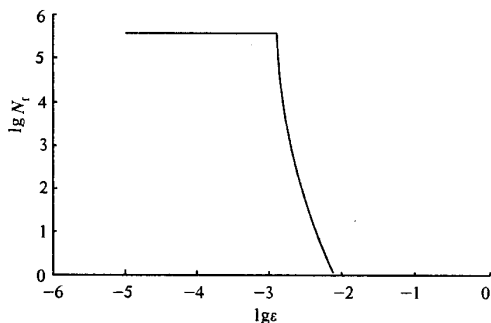


图 3 应变-寿命关系图

Fig.3 Figure of stress-life

计算结果表明,当 $\varepsilon_a < 0.00133$ 时, N_f 都近似等于 376 801. 因此,可认为 $\varepsilon_a < 0.00133$ 时,基本上对裂缝开裂作用趋近于零;当 $\varepsilon_a \geq 0.00133$ 时, N_f 随着 ε_a 增加而急剧减小;当 $\varepsilon_a = 0.008$ 时, $N_f = 1.001$;当 $\varepsilon_a \leq 0.00801$ 时, $N_f < 1$. 因此可认为当 $\varepsilon_a \leq 0.0081$ 时,荷载作用一次即达到破坏标准.

综上所述,可认为沥青混合料开裂的拉应变阈值为 0.00133,拉应变极限值为 0.00801.

5 结语

在合理可行的直接拉伸疲劳试验的基础上,分析平均应力的影响,建立沥青混合料的应变-寿命疲劳方程,可作为沥青路面疲劳开裂寿命预估的重要依据,并提出沥青混合料开裂的拉应变阈值和极限值.

参考文献:

- [1] 葛折圣,黄晓明. 沥青混合料应变疲劳性能的试验研究[J]. 交通运输工程学报,2002,2(1):1-4.
- [2] JTJ 052-2000. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [3] 赵名泮. 应变疲劳分析手册[M]. 北京:科学出版社,1987:23-26.
- [4] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005:714-715.
- [5] 周传月,郑红霞,罗慧强,等. MSC. Fatigue 疲劳分析应用与实例[M]. 北京:科学出版社,2005:34-35.
- [6] GRAHAM J. Fatigue Design Handbook[M]. Society of Automotive Engineers. New York, 1968:233-236.
- [7] FUCHA H O. Fatigue under Complex Loading[J]. SAE. 1977(6):102-104.
- [8] 仰建岗,王秉纲. 沥青路面贫混凝土基层应力计算[J]. 郑州大学学报(工学版),2006,27(1):59-62.

Research on Equation of Strain-life Fatigue for Asphalt Mixture

YANG Jian-gang^{1,2}, WANG Bing-gang¹, CHEN Shuan-fa¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Jiangxi Province Communications Research Institute, Nanchang 310000, China)

Abstract: Based on the world-wide researches, the reasonable and feasible testing conditions of direct tension for asphalt mixture included specimen dimension, judgment, controlled mode, load frequency and test temperature are determinated. With the fatigue test results by various strain level, equation of strain-life fatigue for asphalt mixture which can be used as a rule to forecast fatigue cracked life is put forward after the revision of average stress. The minimum and maximum tension strains of fatigue cracked for asphalt mixture are also advanced. Equation of strain-life fatigue for asphalt mixture based on direct tension tests of asphalt mixture is better to explain the fatigue character of asphalt mixture. The minimum and maximum tension strains of fatigue cracked for asphalt mixture could enough express the proceeding of asphalt mixture fatigue damage.

Key words: highway engineering; asphalt mixture; strain-life fatigue equation; fatigue crack