

AC-13 沥青混合料疲劳能耗模型分析

严恒¹, 朱洪洲¹, 唐伯明¹, 高爽²

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074 2 辽宁省交通科学研究院, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 针对 AC-13 沥青混合料进行了不同试验条件下的疲劳试验; 分析了每次加载下的耗散能与荷载作用次数之间的关系; 利用数理统计的方法研究了试验条件对总累积耗散能与疲劳寿命的影响。结果表明: 总累积耗散能与疲劳寿命之间的关系与荷载作用模式有关, 与试验温度及加载频率无关。
关键词: 道路工程; 耗散能; 重合性检验; 沥青混合料; 疲劳寿命
中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-0696(2010)04-0559-04

Study on Fatigue-Dissipated Energy Model of AC-13 Asphalt Mixture

YAN Heng¹, ZHU Hong-zhou¹, TANG Bo-ming¹, GAO Shuang²

(1 Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China
2 Liaoning Communication Scientific Research Institute, Shenyang 110015, Liaoning, China)

Abstract By carrying out fatigue test under different conditions of AC-13 asphalt mixture, the relation between dissipated energy per load and loading times was analyzed. The impact of test conditions on accumulated dissipated energy and fatigue life was studied through statistical methods. The result indicated that the relationship between accumulated dissipated energy and fatigue life was relevant to load mode while it had nothing to do with test temperature and loading frequency.
Key words road engineering; dissipated energy; coincidence check; asphalt mixture; fatigue life

沥青路面在车辆荷载作用下, 容易产生疲劳裂缝。疲劳开裂已成为路面结构破坏的一种主要破坏形式。为了预测沥青混合料的疲劳寿命, 研究者通常采用现象学方法^[1], 在双对数坐标系下, 建立应力或应变与疲劳寿命关系。

沥青混合料具有黏弹性的特征, 因此可以从能量的角度来研究其疲劳破坏特性^[2]。Van Dijk^[3]指出总累积耗散能与疲劳寿命之间的关系与试验方法、温度和频率以及加载控制模式无关, 然而 Tayebali^[4]却认为总累积耗散能与疲劳寿命的关系不仅同沥青混合料的组成有关, 还依赖于试验条件。因此笔者选择 AC-13 级配沥青混合料, 研究了不同试验条件下每次加载时耗散能变化趋势, 建立了总累积耗散能 W_f 与疲劳寿命 N_f 的关系, 利用数理统计方法进行了不同试验条件下 W_f-N_f 的重合性检验。

1 耗散能的基本理论

对沥青混合料施加持续的周期荷载时, 由于沥青混合料的黏弹性性质, 一个完整循环内, 加荷、卸荷时的应力、应变曲线将首尾相接形成滞后环见图

1, 这个滞后环的面积就被称为耗散能。

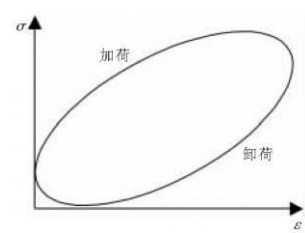


图 1 滞后环线
Fig 1 Hysteretic loop

在疲劳试验中, 这些滞后环的不同预示着有一定数量的耗散能导致了材料的损伤, 张婧娜等^[5]的研究认为: 黏弹性材料的破坏是一个能量耗散的过程, 外力对材料所做的功可转化成如下形式的能量: ①作为弹性应变能被贮存; ②作为流动被消耗; ③裂纹发生、发展产生新表面时转化为表面能。对于正弦加载波形, 第 i 个周期的耗散能可表示为^[6]:

$$w_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \Phi_i \quad (1)$$

式中: w_i 为 i 次加载周期的耗散能; σ_i 为 i 次周期的应力峰值; ε_i 为 i 次周期的应变峰值; Φ_i 为 i 次周期

应力与应变间的相位角, 对于黏弹性材料, $0 < \Phi < \pi/2$

研究表明^[7], 沥青混合料的疲劳寿命 N_f 和到达疲劳破坏时的总累积耗散能 W_f 可以用式 (2) 来表示:

$$\lg W_f = A + z \lg N_f$$

(2)

式中: W_f 为总累积耗散能; N_f 为达到破坏时的重复荷载作用次数; A 、 z 为由试验确定的系数。

2 沥青混合料疲劳试验

2.1 试验材料

试验选用了中海 70# 沥青, 指标试验结果符合重交通道路石油沥青质量要求。集料选用了重庆南山产的石灰岩, 填料采用了石灰岩磨细的矿粉。AC-13 沥青混合料的最佳沥青用量由马歇尔法确定, 为 5.0%。

2.2 试验方案

试件成型方法: 按 JTJ 052—2000/T 0703—93《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[8] 规定的轮碾压实并切割成小梁的方法成型试件, 小梁尺寸为 400 mm × 60 mm × 50 mm, 两端支点距离 355.5 mm。

控制模式: 应力控制, 应变控制。

加载频率: 10 Hz, 15 Hz

试验温度: 5℃, 15℃。

3 试验结果分析

3.1 不同试验条件下耗散能变化规律分析

在循环荷载作用下, 沥青混合料的劲度模量随着加载次数的增加而不断减少, 荷载的每次作用导致试件消耗不同的能量, 变化趋势与加载模式, 试验温度, 加载频率有关。为了减小试验数据的波动, 以及数据分析的简便, 根据疲劳寿命的长短, 取不同的次数为单位荷载次数^[9], 得出不同试验条件下的耗散能 W 与荷载作用次数 N 的关系曲线。

3.1.1 不同加载模式下的 $W-N$ 关系研究

图 2 为不同加载模式下荷载作用次数与耗散能的相关关系。

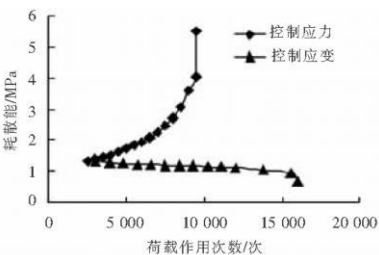


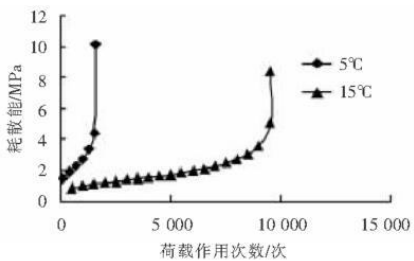
图 2 耗散能与荷载作用次数关系曲线

Fig. 2 $W-N$ curve at different control mode

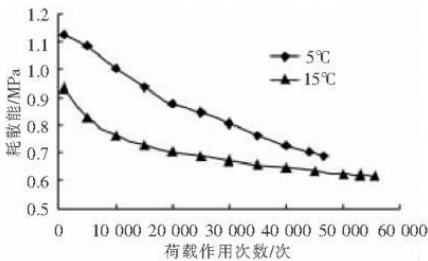
从试验结果可以看出, 对于控制应力模式, 每次加载的耗散能随着荷载作用次数的增加而增大, 而对于控制应变模式, 情况则相反。这是由于控制应力模式下, 荷载恒定不变, 随着荷载作用次数的增加, 导致试件变形加大, 由式 (1) 可知耗散能逐渐增大, 直至试件破坏。对于控制应变模式, 试件的变形恒定, 施加的荷载却逐渐减小, 根据式 (1) 耗散能随着加载次数逐渐减小, 直到破坏标准时, 试验终止。

3.1.2 不同试验温度下的 $W-N$ 关系研究

根据试验结果, 得到了不同温度下的 $W-N$ 关系曲线, 见图 3。



(a) 控制应力下



(b) 控制应变下

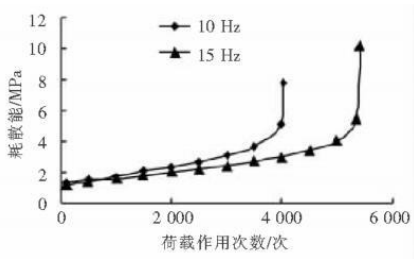
图 3 不同温度时 $W-N$ 关系

Fig. 3 $W-N$ curve at different test temperatures

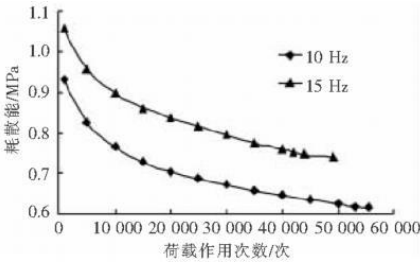
由图 3(a) 可知在控制应力模式下, 5℃ 下耗散能增大幅度大于 15℃, 这是由于相同应力比下, 5℃ 下作用于试件的荷载更大, 试件消耗了更多的能量, 破坏速度更快。图 3(b) 表明, 相同微应变下, 5℃ 下的试件承受的荷载比 15℃ 下的大, 因此每周期的耗散能比 15℃ 条件时大, 试件更容易破坏。

3.1.3 不同频率下的 $W-N$ 关系研究

图 4 给出了不同频率下的 $W-N$ 关系曲线。



(a) 控制应力下



(b)控制应变下

图 4 不同频率时 $W-N$ 关系

Fig 4 $W-N$ curve at different loading frequency

由图 4(a)可知,在控制应力条件下,频率越大,沥青混合料的劲度模量越大,试件变形小,每周周期荷载产生的耗散能少,因此,较高加载频率时的试件表现了较高的疲劳寿命。由图 4(b)可知,在控制应变条件下,频率增大时,试件的初始劲度模量变大,试件承受了更大的荷载,消耗的能量大于较低频率时的试件,因此较高加载频率时的试件表现了较低的疲劳寿命。

从图 2~图 4中可以看出,不同控制模式、温度或者频率时,试件在每次加载下的耗散能表现出相同的规律:控制应力模式下每次加载的耗散能随着荷载作用次数的增加而增加,控制应变模式下则相反。通过图 2~图 4不能区分出式(2)所表示的关系是否与试验条件有关。

3.2 不同试验条件下 W_f-N_f 重合性关系检验

为了检验不同条件下疲劳试验的总累积耗散能 W_f 与疲劳寿命 N_f 关系是否一致,分别绘制了 W_f-N_f 关系曲线,利用数理统计的方法进行了重合性统计检验^[10]。

3.2.1 重合性统计检验简介

将不同试验方法下得到的 W_f 、 N_f 值进行对数处理,按式(2)将其关系拟合成回归直线,并计算出两种状态下的残差值 SSE_1 、 SSE_2 。

然后,将不同状态下的 W_f 、 N_f 值合在一起按式(2)进行拟合成回归直线,计算出此时的残差值 $SSE_{\text{合}}$ 。

最后,利用 F 检验,假若 $F^* < F(0.95, n_1 + n_2 - 3) = 19$

$$F^* = \frac{SSE_{\text{合}} - (SSE_1 + SSE_2)}{2} \cdot \frac{SSE_1 + SSE_2}{n_1 + n_2 - 3},$$

则说明两条直线具有较好的重合性,也即按式(2)表示的 W_f-N_f 具有唯一的相关关系,不受试验条件的影响;反之,不同状态下的 W_f-N_f 关系不具有唯一的相关关系,依赖于试验条件。

3.2.2 不同加载模式下的 W_f-N_f 重合性检验

在 15℃、10Hz 条件下,对 AC-13 沥青混合料

进行了不同加载模式下的疲劳试验,按式(2)对曲线进行回归,对图 5 中的曲线进行重合性检验,结果见表 1。由表 1 分析可知, $F^* > F(0.95, n_1 + n_2 - 3)$, 即两条曲线不具有重合性,也就是 W_f-N_f 关系与荷载作用模式有关。

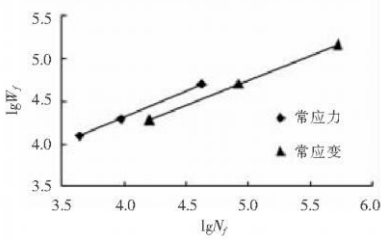


图 5 AC-13 沥青混合料 W_f-N_f 关系

Fig 5 W_f-N_f curve of AC-13 at different control mode

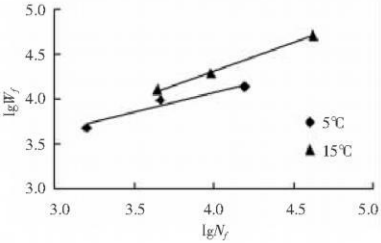
表 1 AC-13(15℃, 10Hz)疲劳试验数据重合性统计性检验结果

Tah 1 Coincidence check results of AC-13 asphalt mixture at 15℃ and 10Hz

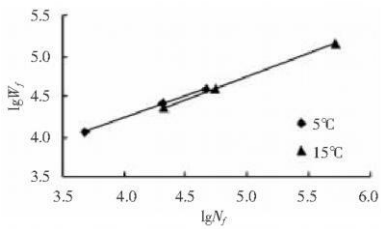
项目	常应力	常应变	二者合并
n	3	3	6
回归值 z	0.618	0.578	0.516
回归值 A	1.835	1.853	2.206
R^2	0.998	0.997	0.969
残差 SSE	0.000238	0.0000754	0.023161
F^*	109.249		
$F(0.95, n_1 + n_2 - 3)$	19		

3.2.3 不同试验温度下 AC-13 混合料 W_f-N_f 重合性检验

在 10Hz 条件下进行了不同温度的疲劳试验(图 6),并进行了重合性检验,结果见表 2。由表 2 分析可知, $F^* < F(0.95, n_1 + n_2 - 3)$, 即两条曲线具有重合性,也就是 W_f-N_f 关系与试验温度无关。



(a)控制应力模式下



(b)控制应变模式下

图 6 不同温度时 W_f-N_f 关系

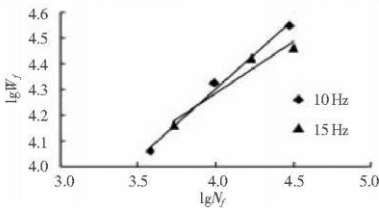
Fig 6 W_f-N_f curve at different temperatures

表 2 AC-13 疲劳试验数据重合性统计性检验结果
Tab 2 Coincidence check results of AC-13 asphalt mixture

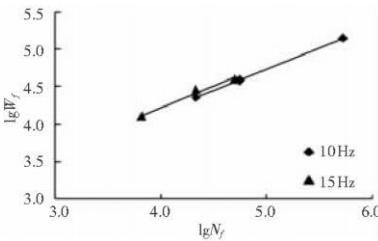
项目	控制应力			控制应变		
	5℃	15℃	二者合并	5℃	15℃	二者合并
n	3	3	6	3	3	6
回归值 z	0.458	0.619	0.643	0.548	0.575	0.542
回归值 A	2.245	1.835	1.650	2.040	1.864	2.048
R^2	0.952	0.998	0.882	0.998	0.999	0.995
残差 SSE	0.005145	0.000238	0.067455	0.0000686	0.000175	0.003316
F^*		17.297			18.884	
$F(0.95, n_1 + n_2 - 3)$		19			19	

3.2.4 不同加载频率下的 $W_f - N_f$ 重合性检验
在 15℃条件下进行了不同频率下的疲劳试验, 见图 7, 并进行了重合性检验, 结果见表 3。由表 3

可知, $F^* < F(0.95, n_1 + n_2 - 3)$, 即两条曲线具有重合性, 也就是 $W_f - N_f$ 关系与加载频率无关。



(a)控制应力模式下



(b)控制应变模式下

图 7 不同温度下 $W_f - N_f$ 关系

Fig 7 $W_f - N_f$ curve at different temperatures

表 3 AC-13 控制应力疲劳试验数据重合性统计性检验结果

Tab 3 Coincidence check results of AC-13 asphalt mixture at stress mode

项目	控制应力			控制应变		
	10 Hz	15 Hz	二者合并	10 Hz	15 Hz	二者合并
n	3	3	6	3	3	6
回归值 z	0.547	0.407	0.477	0.575	0.583	0.548
回归值 A	2.121	2.659	2.385	1.864	1.891	2.020
R^2	0.992	0.949	0.901	0.999	0.986	0.995
残差 SSE	0.000926	0.002669	0.008458	0.000175	0.001846	0.005942
F^*		2.028			2.910	
$F(0.95, n_1 + n_2 - 3)$		19			19	

4 结 论

1)通过研究不同试验条件下 AC-13 沥青混合料每次加载下的耗散能与疲劳寿命的关系, 可以发现控制应力模式下每次加载的耗散能随着荷载作用次数的增加而增加, 控制应变模式下则相反。
2)总累积耗散能与疲劳寿命之间可以建立形式如 $\lg W_f = A + z \lg N_f$ 的关系。通过数理统计的方法, 研究了不同试验条件对 AC-13 沥青混合料的总累积耗散能 W_f 与疲劳寿命 N_f 关系的影响, 表明 $W_f - N_f$ 之间的关系与荷载作用模式有关, 与试验温度及加载频率无关。

参考文献:

[1] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 458- 460.

[2] 刘伟民. 基于粘弹性理论的沥青混合料劈裂疲劳预测方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006 40- 46.

[3] Van D W, Visser W. The energy approach to fatigue for pavement design [J]. Journal of AAPT, 1977, 46: 1- 40.

[4] Tayebali A A, Rowe G M, Sousa J B. Fatigue response of asphalt aggregate mixtures [J]. Journal of AAPT, 1992, 61: 333- 360.

[5] 张婧娜, 谭忆秋, 张肖宁. 应用能量原理预测沥青混合料的疲劳破坏 [J]. 中国公路学报, 1998, 11(4): 11- 17.

[6] Sias D J. Development of simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic continuum damage model and its implementation to westrack mixtures [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2001: 4- 20.

[7] Van D W, Moreaud A, Dijk Q A, et al. The fatigue of bitumen and bituminous mixes: proceedings [C] // 3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. London: International Society for Asphalt Pavements, 1972: 354- 366.

[8] JTJ 052—2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

[9] 高爽. 沥青混合料疲劳损伤机理研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学土木建筑学院, 2008 40- 41.

[10] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.