

沥青混合料间接拉伸疲劳试验方法评述

仲崇刚, 侍坛涛

连云港市金泰公路工程有限公司, 江苏 连云港

收稿日期: 2024年10月24日; 录用日期: 2024年11月28日; 发布日期: 2024年12月6日

摘要

间接拉伸疲劳试验作为评价沥青混合料疲劳性能的方法之一, 针对该试验方法应用中存在的试验结果不可比和出现与常规认识不符的问题, 从力学原理、控制逻辑、加载模式等方面对间接拉伸疲劳试验方法进行了剖析, 并对疲劳方程建立方法进行了对比分析, 结果表明: 使水平向传感器的测试值在100~400 $\mu\epsilon$ 之间及间歇式加载是核心, 保证了使试件处于线粘弹性范围, 为保证测试结果的可比性和准确性, 应遵循原测试方法的加载要求; 初始应变同疲劳寿命的相关性较应力比和疲劳寿命相关性高。研究结论可为采用该方法准确评价混合料疲劳性能提供参考和借鉴。

关键词

道路工程, 沥青混合料, 间接拉伸疲劳, 应力控制, 应变控制

Review of Indirect Tensile Fatigue Test Methods for Asphalt Mixtures

Chonggang Zhong, Tantaoshi

Lianyungang Jintai Highway Engineering Co., Ltd., Lianyungang Jiangsu

Received: Oct. 24th, 2024; accepted: Nov. 28th, 2024; published: Dec. 6th, 2024

Abstract

Indirect tensile fatigue test is one of the methods to evaluate the fatigue properties of asphalt mixture. In view of the problems that the test results in the application of this test method are incomparable and inconsistent with the conventional understanding, the indirect tensile fatigue test method is analyzed from the aspects of mechanical principle, control logic, loading mode, etc., and the fatigue equation establishment methods are compared and analyzed. The results show that: The test value of the horizontal sensor is between 100 and 400 $\mu\epsilon$ and intermittent loading is the core to ensure that the specimen is in the linear viscoelastic range. In order to ensure the comparability

and accuracy of the test results, the loading requirements of the original test method should be followed. The correlation between initial strain and fatigue life is higher than that between stress ratio and fatigue life. The research results can provide reference for the accurate evaluation of fatigue properties of mixtures by this method.

Keywords

Road Engineering, Asphalt Mixture, Indirect Tensile Fatigue, Stress Control, Strain Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

间接拉伸疲劳试验方法因成型沥青混合料试件简便、理论基础明确、结果可信度高,得到了较多应用[1]。该方法最早由欧盟提出,并建立了相应试验方法 EN 12697-24 附录 E (简称附录 E) [2]。

早期被我国引入后,受限于专用设备和专用程序限制,我国研究者根据该试验方法,自行设计了相应夹具,并开展了不同加载模式的研究讨论。严金海[3]采用间歇半正弦波荷载加载,加载频率 2 Hz,试验温度 15°C,疲劳破坏标准为竖向变形 10 mm;黎晓[4]采用应力控制方式进行重复荷载加载,采用连续半正弦波荷载加载,加载频率 10 Hz,测试温度 10°C、20°C、30°C;陈少军[5]在试验前先对试件进行预压 60 s,后测试不同应力水平下混合料的疲劳特性。沈洪涛[6]选择 800 N 正弦荷载水平,试验温度为 25°C,频率为 10 Hz,终止条件为混合料劲度折减到 50%。董玲云[7]采用应力控制模式,加载波形为半正矢波,加载频率为 10 Hz,试件预压荷载为 20 kPa,预压时间 30 s。但采用此方法后,出现了疲劳试验评价结果与常规认识矛盾的问题,基于此,作者提出采用间接拉伸疲劳寿命比和疲劳寿命损失率对再生混合料疲劳特性的变化规律进行了系统评价。

综上,各研究者根据不同的研究目的,有针对性地设计了试验方案,但存在不按照原试验方法的试验结果不具有可比性和试验结果出现与常规认识不符的问题。基于此,本文从力学原理、控制逻辑、加载模式等方面对间接拉伸疲劳试验方法进行了剖析,并对疲劳方程建立方法进行了对比分析,研究结论可为采用该方法准确评价混合料疲劳性能提供参考和借鉴。

2. 试验方法解析

(1) 试件制作

研究对象为基质沥青制备的 AC-25 热再生混合料, RAP 掺量分别为 30%、45%、60%,热再生混合料分别命名为 R-30、R-45、R-60。沥青采用东莞东交沥青有限公司生产的 70 号基质沥青,技术指标如表 1 所示,三组再生沥青混合料的矿料掺配比例如表 2 所示。

(2) 试件尺寸

EN 12697-24 附录 E 规定:最大粒径为 25 mm 时,圆柱体试件直径为 100 mm,厚度大于等于 40 mm;最大粒径为 38 mm 时,圆柱体试件直径为 150 mm,厚度大于等于 60 mm。对照我国《公路工程沥青及沥青混合料测试规程》及《公路沥青路面施工技术规范》,当最大公称粒径 ≤ 26.5 mm 时,圆柱体试件直径为 100 mm,厚度大于等于 40 mm;当最大公称粒径 ≥ 26.5 mm 时,圆柱体试件直径为 150 mm,厚度大于等于 60 mm,本文采用的间接拉伸疲劳试验的试件尺寸为 $50 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ 。

Table 1. Result of asphalt testing
表 1. 沥青检测结果

| 试验项目 | 单位 | 技术要求 | 试验结果 | 试验方法 |
|-----------------|--------|-------|------|-------|
| 25℃针入度 | 0.1 mm | 60~80 | 66 | T0604 |
| 软化点 | ℃ | ≥46 | 47.5 | T0606 |
| 10℃延度 | cm | ≥15 | 32.0 | T0605 |
| 薄膜加热试验(TFOT)残留物 | | | | |
| 质量损失 | % | ≤±0.8 | 0.05 | T0609 |
| 10℃延度 | cm | ≥6 | 7.5 | T0605 |
| 15℃延度 | cm | — | 28 | T0605 |
| 25℃针入度比 | % | ≥61 | 69 | T0604 |

Table 2. AC-25 hot recycled mixture mineral proportion
表 2. AC-25 热再生混合料矿料比例

| 类型 | RAP/15~25 mm | RAP/10~15 mm | RAP/0~10 mm | 23~32 mm | 17~23 mm | 11~17 mm | 6~11 mm | 3.5~6 mm | 0~3.5 mm | 矿粉 |
|------|-----------------|-----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|----|
| R-30 | 0 | 8 | 22 | 10 | 11 | 14 | 13 | 6 | 14 | 2 |
| R-45 | 20 | 0 | 25 | 10 | 12 | 8 | 0 | 0 | 25 | 0 |
| R-60 | 20 | 10 | 30 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |

(3) 位移监测

利用专属定位工具在圆柱体试件圆周一侧对向粘贴传感器固定装置, 保证固定装置与圆心在同一水平面。安装传感器固定在装置上, 以监测加载过程中试件水平方向位移, 如图 1 所示。



Figure 1. Indirect tensile test
图 1. 间接拉伸试验

(4) 加载型式

EN 12697-24 附录 E 规定加载波形采用循环间歇式半正矢波形进行加载, 单个加载周期 500 ms, 加载 100 ms, 间歇 400 ms。控制模式为应力控制, 施加的荷载应使水平向传感器的测试值在 100~400 $\mu\epsilon$ 之间, 同时使疲劳加载次数在 10^3 ~ 10^6 之间。使水平向传感器的测试值在 100~400 $\mu\epsilon$ 之间及间歇式加载的

目的均是为了使试件处于线粘弹性范围。

(5) 控制逻辑

间接拉伸疲劳试验采取恒定应力间歇控制控制, 控制逻辑如图 2 所示。在恒定应力作用下, 通过水平向的两个应变传感器采集每个周期的 D_a 、 D_r 和 D_p , 计算每个周期的水平应力、水平应变及劲度模量等, 最终获取力与水平永久变形的关系。图 2 中, 力的单位是牛顿(N)位移的单位是毫米(mm), 时间单位为毫秒(ms), 模量单位为 MPa。

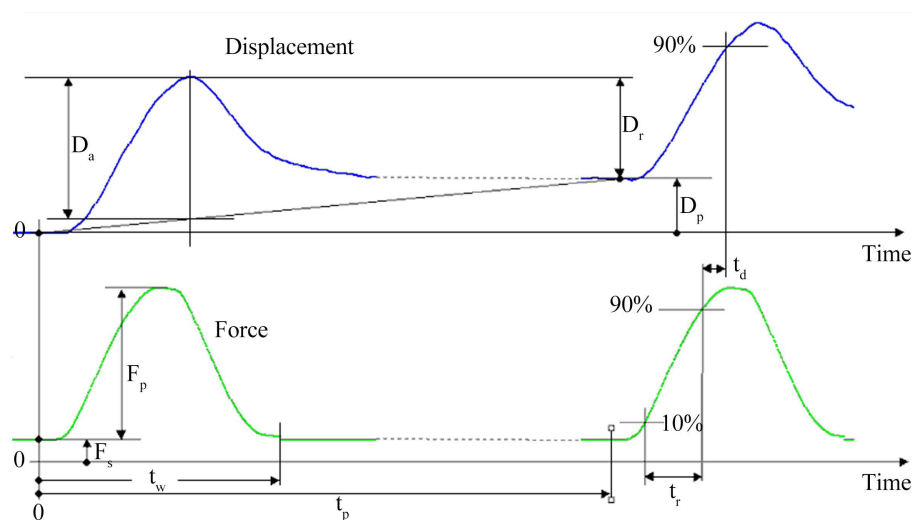


Figure 2. Control logic for indirect tensile fatigue test

图 2. 间接拉伸疲劳试验控制逻辑

图中各参数的意义如下:

F_s ——压头与试件接触力, 要求的控制值为用户输入的峰值力参数值的 10%, 本文设置为 20 N;

F_p ——每个周期施加到试样的荷载, 为最大荷载与接触力的差值, N;

t_w ——加载时长, 本试验为 100 ms;

t_p ——荷载周期, 包括加载波形的周期和间歇时长, 本试验为 500 ms;

t_r ——峰值力值的 10% 到 90% 上升的时间;

t_d ——相位角;

D_p ——由水平(D_{ph})或垂直(D_{pv})方向传感器监测到的试样在水平或垂直方向的总永久变形, mm;

D_r ——试样在水平(D_{rh})或垂直(D_{rv})方向的回弹变形, mm;

D_a ——水平位移产生的总变形幅值, mm。

(6) 疲劳方程建立方法

在间接拉伸疲劳试验过程中, 水平永久变形逐渐增加, 劲度模量下降, 试验终止条件为混合料劲度折减到 50%。研究[2]发现连续数个疲劳周期水平向应变率为 2.0 左右时, 混合料劲度恰好折减到 50% 左右, 因此, 也常采用水平向应变率 > 2.0 作为终止条件。

附录 E 提出采用间接拉伸疲劳试验方法建立的疲劳公式为:

$$\lg(N_f) = k + n \lg(\epsilon_{ini}) \quad (1)$$

其中, N_f 为疲劳寿命, 意义同上文, k 和 n 为拟合系数。

由附录 E 所建立的疲劳公式可以看出, 虽然直接拉伸疲劳试验方法采取的是应力控制模式, 但是疲

劳方程却不是应力比与疲劳寿命的相关关系, 其本质为“假应变”控制模式, 疲劳方程为初始应变与疲劳寿命的相关关系。

3. 试验分析与评述

3.1. 试验分析

严格按照附录 E 试验方法, 对 AC-25 型三组再生沥青混合料进行了直接拉伸疲劳试验, RAP 掺量分别为 30%、45%、60%, 分别简称为 R-30、R-45、R-60。其中 60% 加入了再生剂, 再生剂掺量为旧沥青的 5%。拟合得到的初始应变和疲劳寿命的双对数坐标如图 3 所示。

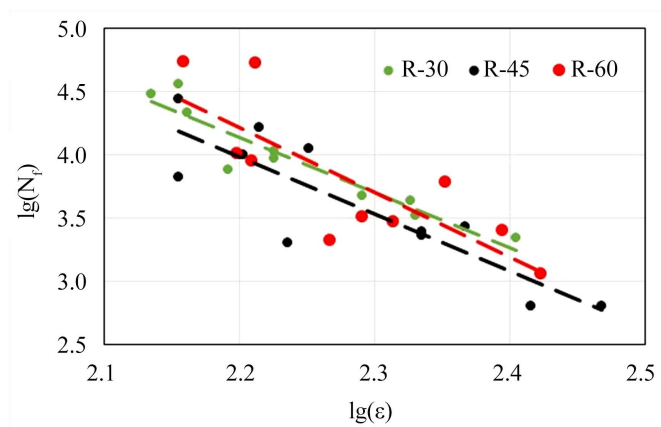


Figure 3. Fatigue equation with initial strain as independent variable
图 3. 以初始应变为自变量的疲劳方程

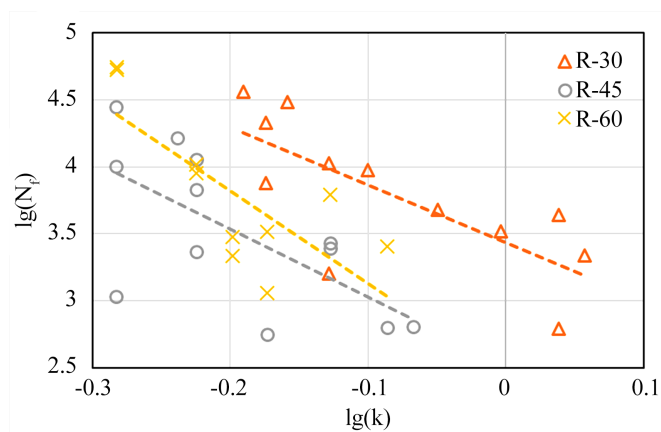


Figure 4. Fatigue equation with stress ratio as independent variable
图 4. 以应力比为自变量的疲劳方程

间接拉伸疲劳试验恒定应力, 与此同时, 通过计算恒定应力与劈裂强度的比值, 可以建立应力比与疲劳寿命的疲劳方程, 如图 4 所示。

(1) 以初始应变和应力比为自变量的疲劳方程斜率绝对值均随掺量增加而变大, 掺量越大, 斜率绝对值越大, 疲劳寿命衰减越快。

(2) 以初始应变为自变量疲劳方程斜率分别为 -4.3540 、 -4.5007 、 -5.1237 , 拟合度分别为 0.8930、0.7566、0.6413; 以应力比为自变量疲劳方程斜率分别为 -4.4985 、 -5.0814 、 -6.9112 ; 拟合度分别为 0.562、

0.438、0.5618。前者斜率绝对值均小于后者, 前者拟合度均大于后者。

(3) 随着 RAP 掺量增加, 再生沥青混合料疲劳寿命减小, 但 R-60 添加再生剂后, 疲劳寿命得到了一定恢复, 超越了 R-45, 甚至恢复到了 R-30 水平。

3.2. 评述

间接拉伸疲劳虽采取应力模式控制, 但试件整体二维应力状态较为复杂, 虽然中心点在二维应力状态下的最大水平拉应力是同一点垂直压应力的三分之一, 但其他点处应力状态较为复杂, 而在整个疲劳损伤过程中, 微裂纹出现, 导致整个试件应力状态变化较大, 所建立的应力比和疲劳寿命的相关性较低。而疲劳加载初期, 试件处于线性粘弹范畴, 第 100 个周期的初始应变值相对稳定, 故建立初始应变同疲劳寿命的相关关系更为稳定。

文献常提到间接拉伸疲劳试验结果出现与常规认识不符的问题, 其原因可能在于未严格按照附录 E 试验方法开展试验, 附录 E 加载频率为 2 Hz, 加载 100 ms, 间歇 400 ms, 留下了充足的恢复和愈合时间, 使每一次加载尽量保持在线性粘弹区间; 而采用 10 Hz 频率加载, 试件未有足够时间恢复和愈合, 产生了较大塑性变形, 但理论计算采用弹性理论假设, 势必会造成较大偏差。

4. 结论

(1) 从力学原理、控制逻辑、加载模式等方面对间接拉伸疲劳试验方法进行了剖析, 间接拉伸疲劳的力学理论基础是弹性力学, 使水平向传感器的测试值在 100~400 $\mu\epsilon$ 之间及间歇式加载的目的均是为了使试件处于线粘弹性范围。

(2) 间接拉伸疲劳采取应力模式控制, 但应力状态较为复杂, 疲劳周期中应力状态变化较大, 应力比和疲劳寿命的相关性较低, 建立初始应变同疲劳寿命的相关关系更为稳定。

(3) 采用初始应变和应力比为自变量建立的疲劳方程均表明疲劳寿命排序为 R-30 > R-60 > R-45, 虽疲劳方程斜率和拟合度不同, 但评价结果一致; 已有文献中提到的间接拉伸疲劳试验结果出现与常规认识不符的问题, 其原因可能在于未严格按照附录 E 试验方法中规定的波形和加载频率开展试验。

参考文献

- [1] 吕松涛, 刘宏富, 郑健龙. 沥青混合料荷载效应分析与抗疲劳设计[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] EN 12697-24-2018 (2018) Bituminous Mixtures—Test Methods—Part 24: Resistance to Fatigue.
- [3] 严金海, 倪富健, 杨美坤. 乳化沥青冷再生混合料的间接拉伸疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1): 58-61+77.
- [4] 黎晓, 梁乃兴. 间接拉伸试验条件下沥青混合料的疲劳行为[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1161-1165.
- [5] 陈少军. 再生沥青混合料强度及疲劳性能试验研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2): 120-122.
- [6] 沈洪涛, 赵树青, 王晓平. 一种评价沥青混合料疲劳性能的简单试验方法[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 151-153+192.
- [7] 董玲云, 何兆益, 黄刚, 等. 热再生沥青混合料的疲劳特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(4): 606-609.