

一种研究沥青混凝土温度疲劳行为的室内试验方法

冯新军,肖洪海 编译

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:由于温度疲劳现象引起的裂缝会导致沥青混凝土路面结构性能和使用质量的严重下降。温度疲劳裂缝发生在气候温和的地区,是受约束的铺装层内部温度循环应变/应力的结果。该文介绍一种在恒定应变荷载作用下测量沥青混凝土试样抗温度疲劳的试验装置。为了模拟沥青混凝土的温度疲劳行为,采用机械方法对沥青混凝土进行单轴加载,在0.01 Hz的频率下实现恒幅正弦应变。试验结果表明:沥青含量、集料来源和沥青结合料等级对沥青混凝土的抗温度疲劳性能影响最大。

关键词:抗温度疲劳性能;沥青混凝土;温度膨胀系数;应变加载

1 引言

温度疲劳裂缝会对沥青混凝土路面的结构和功能造成相当大的影响。沥青混凝土的温度应力是由于沥青混合料的热胀冷缩特性导致其体积变化而产生的。沥青混凝土面层与基层之间存在摩擦约束,因此温度变化导致沥青混凝土面层产生了温度应力。由于体积的变化,表面最终会产生由上到下的裂缝,从而降低其结构性能。路面裂缝如果不进行修复,路面上的水渗入路基后,会产生严重的结构问题和使用质量的下降。由于温度裂缝对路面性能的影响较大,近几十年来引起了路面工程师的广泛关注。这些裂缝一般表现为两种不同的方式:温度疲劳裂缝和低温开裂。前者是路

面内部温度循环变化的结果,后者只是因为气温的下降,产生了超过沥青混凝土抗拉强度的温度应力。在这两种情况下,沥青混凝土的温度膨胀系数都可以用来估计温差作用下路面的总体积变化,以及产生的温度应力。

自20世纪70年代中期以来,沥青混凝土路面的温度疲劳开裂现象一直受到关注。如得克萨斯地区产生的严重横向裂缝主要原因是温度疲劳开裂。为了观察这一现象的影响因素,可以在试验室中对沥青混凝土试件进行温度循环。但由于沥青混凝土导热系数低,测试过程时间长,试验成本高。在路面设计中考虑温度疲劳的另一种方法是利用数值模型来估计温度的时间序列和计算温度应变。有研究者认为沥青混凝土的温度疲劳开裂主要受柔性铺装层引起的高循环应

- *****
- [2] Ibrahim MR, Katman HY, Karim MR, et al. A Review on the Effect of Crumb Rubber Addition to the Rheology of Crumb Rubber Modified Bitumen[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 2013: 1—8.
- [3] Nazzal MD, Iqbal MT, Sang SK, et al. Evaluating the Mechanical Properties of Terminal Blend Tire Rubber Mixtures Incorporating RAP[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 138: 427—433.
- [4] 杨小龙. 基于原材料特性的橡胶沥青改性机理研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2015.
- [5] Sienkiewicz M, Borzedowska—Labuda K, Wojtkiewicz A, et al. Development of Methods Improving Storage Stabili-

- ty of Bitumen Modified with Ground Tire Rubber: A Review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 159: 272—279.
- [6] 杨毅文, 袁浩, 马涛. 脱硫橡胶沥青溶胀原理及路用性能[J]. *公路交通科技*, 2012(2).
- [7] 吕泉, 黄卫东, 柴冲冲. Terminal Blending 橡胶沥青的特性与应用前景[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014(4).
- [8] 宋朝林, SONG Chaolin. 基于高模量剂和 Terminal blend 橡胶沥青复合改性技术耐久性高 RAP 掺量热再生混合料性能研究[J]. *公路工程*, 2017(5).

变/应力水平控制,而不仅仅是受温度循环频率的控制。需要注意的是,温度应变或应力的频率明显小于相关疲劳损伤的加载频率(10~50 Hz)。利用极低的频率加载波形,可以在试验室内用控制应变加载来模拟现场沥青混凝土的力学疲劳行为。

由于测试时间较长,只有少数研究涉及在试验室内使用较低频率下的温度循环来模拟温度疲劳;大多数研究是在恒定应变和温度模式下进行两点或四点弯曲梁疲劳试验。然而,实际路面温度疲劳通过沿路面中心线循环的热胀冷缩导致沥青混凝土面层损伤;经调研可知,这种类型的损伤从未在试验室中通过单轴循环加载进行模拟。由于温度疲劳一般发生在-7~21℃,因此温度疲劳试验时所采用的温度应在此范围内选择,以便在试验室条件下合理模拟现场温度状况。需要注意的是,选择接近下限值的试验温度会导致脆性疲劳行为,而接近上限值的试验温度可能会导致以松弛为主的沥青混凝土疲劳行为。

众所周知,集料来源和级配、沥青结合料等级、沥青含量和改性剂类型均影响沥青混凝土的疲劳寿命和抗疲劳开裂性能。在集料级配方面,认为间断级配集料在温度疲劳性能方面优于密级配集料。此外,随着集料结构中嵌挤程度的增加,沥青混合料强度增加,其耐温度疲劳性能提高。

对于沥青结合料等级,较高的针入度等级通常会提高疲劳寿命。研究还发现,劲度较低的沥青结合料通常能提高抗疲劳开裂性能。当沥青含量达到一定时,温度疲劳性能有一定的提高。改性剂也可以提高沥青混凝土的温度疲劳寿命。沥青微观结构中的蜡结晶也会影响沥青混凝土的温度疲劳性能。

该文采用控制应变幅度加载测试约束试件的修正温度应力试验装置(TSRST),对沥青混凝土的温度疲劳性能进行测试。通过改变几种混合设计变量,制备了压实沥青混合料试样,并对其进行试验研究。在试验方案中,定义了3个响应变量来表征试样的抗温度疲劳性能。采用统计分析评价试验结果中重要的混合设计变量,研究结果将有助于减轻柔性路面的温度疲劳开裂。该文首先确定具有统计意义的混合设计变量,然后提出一种新的力学方法模拟试验室条件下温度疲劳过程。

2 试验材料和方法

研究不同混合料对沥青混凝土温度疲劳性能的影响。

响。采用的混合设计变量为两种不同级配的集料;两种沥青等级(表1、2和图1);3种沥青用量:最佳用量和最佳用量±0.5%。基质沥青和基质沥青中掺SBS的改性沥青。

表 1 集料性能

集料	相对密度	吸水率/%	洛杉矶磨值/%
石灰石	2.751	1.45	28
玄武岩	2.933	1.00	15

表 2 沥青黏合剂性能

PG 等级	相对密度	针入度值/ (0.1 mm)	针入度等级
PG 64-22	1.025	54	50/70
PG 58-22	1.034	73	70/100

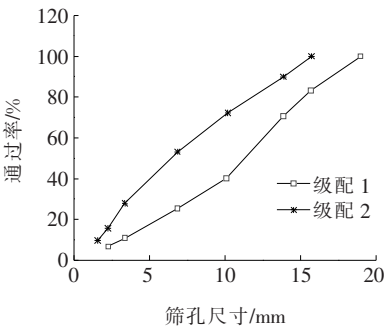


图 1 集料级配

制备沥青混合料后,在烘箱中放置3 h,进行短期老化处理;然后用法国(LCPC)旋转压实机对其进行压实。压实后,用金刚石锯从板上锯下尺寸为50 mm×65 mm×250 mm的棱柱梁试件。然后,对部分沥青混凝土试样进行不同温度下的开裂性能试验。剩余试样在试验室环境温度下保存5年,以测试其温度疲劳性能。这一长时间的老化过程不是烘箱加速老化,而是让试样自然老化硬化。以往的研究表明:除非温度疲劳开裂是时效硬化的,否则温度疲劳开裂不是一种可行的破坏模式。试件经长期老化后,两端用高强度环氧树脂黏结在钢板上,然后安装到TSRST装置中,以测定相应的温度性能,即:温度膨胀/收缩系数和温度疲劳抗力。试验中应注意试件轴线与加载平台必须是同心圆,同时相互垂直,以保证不会因偏心加载而产生弯矩,从而导致试件早期断裂。因此,不符合这一标准的试样被永久丢弃,因为它们是用热固性环氧树脂黏在平板上的,不可能在不损坏试样的情况下恢复原状。由于试样的老化时间较长,也不可能为进一步测试而复制它们。因此,将这些样本作为统计分析中

的缺失数据点。

在测试开始前,对测量变形的装置进行温差校准,以保证测试系统的精度。使用的 LVDT(位移传感器)已由制造商进行了温度补偿,最高可达 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此无需进一步温度补偿。然而,要对殷钢进行校正,以补偿引起的温度梯度,特别是在测量温度膨胀/收缩系数时。校准程序确保了殷钢长度的校正,殷钢与线性变差变压器(LVDTs)一起用于测量试样沿轴线的体积应变。这样,测量中由于温度变化导致 LVDT 读数的误差显著降低。

在试验过程中,首先对每个试样的温度系数进行测量,计算出预计的温度梯度在现场产生的循环温度应变幅值。然后,在选定的频率和温度下将计算得到的应变机械地施加到每个试样上,以评估其温度疲劳性能。使用的 TSRST 机器是由钢框架制成的,为了防止温度损失,其内壁内衬为 6 cm 厚的保温材料。采用 20 cm 厚的绝缘材料保护测压元件不受室内冷却部分的影响。将计算机和数据采集系统连接到 TSRST 机器上,用来控制测试参数和记录试验数据。试验温度由粘贴在梁试样每个表面的 4 个电阻温度检测器(RTD)控制。在试验过程中,还将探头固定在虚拟的试样内,用于测量芯温(图 2)。通过表面和岩芯温度的同步测量,提高了温度系数和温度疲劳试验下温度控制和测量的精度。

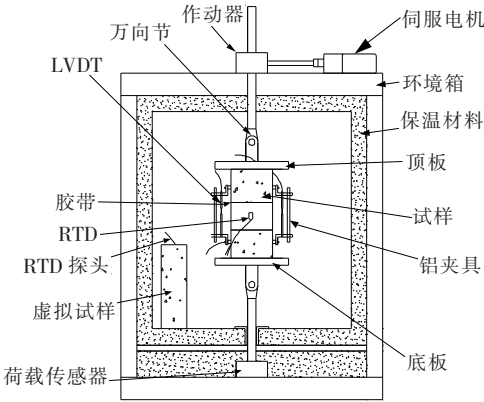


图 2 试验框架和冷藏箱示意图

2.1 选择温度范围来计算应变幅值

柔性路面在使用过程中,由于温度的日循环变化,也会发生温度疲劳开裂。为了模拟这种类型的破坏,有必要找到一个温度范围,以便在试验室中对破坏进行评估。因此,为了研究温度疲劳对柔性铺装层的影响,土耳其气象局收集了安卡拉市过去 13 年的天气数据进行分析,发现温差范围仅在 $-7\sim+21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会发

生温度疲劳。在疲劳试验中,选取频率最高的温差 $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算应变幅值(图 3)。大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差的试验结果也显著;然而,由于需要较长的测试时间,在试验中只考虑了一个单一温差。

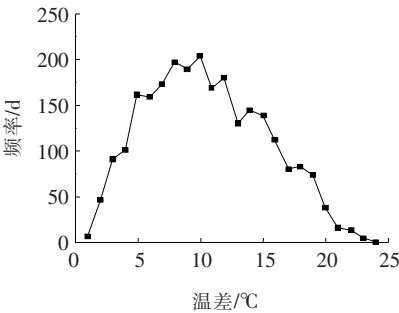


图 3 安哥拉市日温差频率图

2.2 试样温度系数的测定

为了测量温度系数,首先将梁试件粘在钢板上,然后安装在 TSRST 机器上,在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下静置 3 h,以达到温度平衡。预处理后,环境温度从 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速度下降,至 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 结束。所选的降温速率足够慢,可保证试样内部温度变化均匀。试验过程中每 30 s 记录一次各 RTD 的轴向变形和实测温度。

为了确定恒幅正弦加载下的温度疲劳抗力。如上所述,首先需要测量各试件的温度系数,从而计算温差为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的应变幅值。为此,采用最小二乘法将纵向应变和温度数据拟合得到式(1)中的 5 参数模型。所有试件测得的温度收缩系数如表 3 所示。式(1)中的模型成功地拟合了试验数据,每个试样的判定系数均大于 0.99。

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} = C + \alpha_g (T - T_g) + R (\alpha_l - \alpha_g) \cdot \ln \left[\exp \left(\frac{T - T_g}{R} \right) \right] \quad (1)$$

式中: ϵ_l 为线性应变; ΔL 为试样长度的变化; L_0 为试样的初始长度; C 为模型截距常数; T 为玻璃态转化温度; R 为定义曲率的常数; α_l 为 $T > T_g$ 的温度系数; α_g 为 $T < T_g$ 的温度系数。

在温度系数测量中,沥青混合料的温度行为可以由橡胶态转变为玻璃态,其特征是存在玻璃态转化温度。例如,在图 4 中,在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时有一个轻微的曲率变化表示在应用的温度范围内存在玻璃态转化点。在这种情况下,必须分别计算在玻璃态转化温度之上和之下的温度系数,如式(1)中 α_l 和 α_g 。因为温度疲劳试验中选择的温差为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,式(1)仅计算玻璃态转化温度以上的温度系数。

表 3 所测试样的温度系数

试样编号	$\alpha_t / (\times 10^{-6} / ^\circ\text{C})$	试样编号	$\alpha_t / (\times 10^{-6} / ^\circ\text{C})$
LF54ZO	33.3	LF73ZO	38.2
LF54ZO	29.8	LF73ZO	36.4
LF54ZO+	37.9	LF73ZO—	38.5
LF54ZO+	38.0	LF73ZO—	40.7
LF54SO—	34.7	BF54ZO+	36.1
LF54SO—	33.7	BF54ZO+	38.5
LF73ZO	35.5	BC73ZO—	38.6
LF73ZO	38.2	BC73ZO—	38.4
LF73ZO	36.4	BC73ZO—	38.7
LF54SO+	37.4	BF73ZO+	38.8
LF54SO+	37.7	BF73ZO+	38.4
LF54SO+	36.7	BC73SO+	44.4
LF73ZO	35.5	BC73SO+	42.2

注: B 表示玄武岩; L 表示石灰岩; C 表示粗级配, F 表示细级配; 54 表示沥青针入度为 54(0.1 mm); 73 表示沥青针入度为 73(0.1 mm); S 表示 SBS 改性沥青; Z 表示未改性沥青; O 表示最佳沥青用量; O—表示沥青用量比最佳用量少 0.5%; O+表示沥青用量比最佳用量多 0.5%。下同。

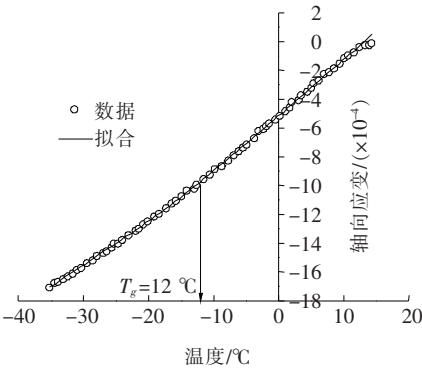


图 4 温度—轴向应变图

测得温度系数后,采用式(2)计算温差为 10 °C 下的温度应变。在疲劳试验中计算温度应变时,必须使用系数 $\alpha_t (T > T_g)$ 的测量值。因为 $\alpha_g (T < T_g)$ 的测量值表示低温开裂阶段,与温度疲劳开裂的温度范围相比,低温开裂发生的温度明显较低。表 4 为每个试样的最大温度应变计算值。

$$\epsilon = \alpha_t \Delta T \tag{2}$$

式中: ϵ 为所选温差 ΔT 计算的温度应变; α_t 为 $(T > T_g)$ 时沥青混凝土的温度系数。

表 4 测量的温度应变

试样编号	数量/ 个	温度应变/ $\mu\epsilon$	
		平均值	标准差
LF54ZO	2	315.5	17.5
LF54ZO+	2	379.5	0.5
LC54SO—	2	342.0	5.0
LF54SO+	3	372.7	3.0
LF73ZO	3	367.0	7.9
LF73ZO—	2	407.0	11.0
BF54ZO+	2	373.0	12.0
BC73ZO—	3	385.7	0.9
BF73ZO+	2	386.0	2.0
BF73ZO—	3	345.3	21.1
BC73SO+	2	433.0	11.0

根据式(2)计算得到的应变值,选择确定最大和最小应变幅值水平。在该研究中,假设最小应变为零,意味着每次加载后完全卸载。利用式(2)求得温差为 10 °C 的最大应变水平。使用的应变波形用式(3)表示:

$$\epsilon(t) = \frac{\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min}}{2} + \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{2} \sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{2}\right) \tag{3}$$

式中: $\epsilon(t)$ 为 t 时刻施加的应变; ϵ_{\max} 为最大应变; ϵ_{\min} 为最小应变; f 为装载/卸载频率。

虽然仪器内温度设置为 5 °C,但温度探测器测得试样表面和中心的平均温度为 4.8 °C 左右(表 5)。

表 5 试验所测的平均温度

试样编号	环境温度/ $^\circ\text{C}$	
	平均值	方差
LF54ZO	4.87	0.10
LF54ZO+	4.84	0.08
LC54SO—	4.79	0.07
LF54SO+	4.87	0.09
LF73ZO	4.88	0.10
LF73ZO—	4.83	0.04
BF54ZO+	4.75	0.02
BC73ZO—	4.86	0.09
BF73ZO+	4.76	0.02
BF73ZO—	4.80	0.24
BC73SO+	4.89	0.07

由表 5 可知:除 BF73ZO—试样外,平均温度测量值标准差均小于或等于 0.1 °C,表明该测试试件的温

度偏差影响可以忽略不计。

温度疲劳试验结束后,将各试件的峰值应力[图 5(a)]除以峰值应变[图 5(b)],计算各试件的弹性模量降低量,实现在加载循环函数下弹性模量值的连续监测。

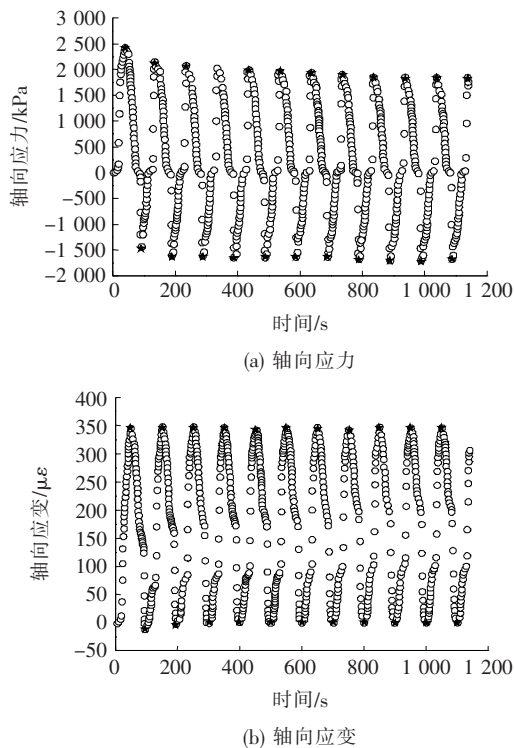


图5 试件峰值应变、应力图

在这个阶段,利用 Matlab 程序开发一个单独的算法来检测和修正每个荷载循环的峰值应力/应变(图 5 中的黑圈)。图 5 只给出了用于计算弹性模量的部分数据,如果给出的是完整的加载周期,那么峰值和循环模式是可见的。

从图 5(b)可以看出:施加的应变与完整的正弦波形略有偏离。这是因为在测试系统中采用机械作动器来加载,而不是采用利于高频加载的液压伺服作动器。作动器系统采用高精度螺杆千斤顶来驱动电机,可以控制 1×10^{-4} mm 变形。尽管机械作动器对载荷和变形控制精度较好,但对计算机生成波形有延迟响应,与目标波形会有轻微偏差。虽然存在这样的缺点,但该系统在疲劳试验期间成功地实现了加载循环的最小和最大应变。

计算出弹性模量曲线后,根据 3 个选定的响应参数:① 弹性模量降低 35%;② 弹性模量降低 50%;③ 弹性模量降低速率。对每个试件的抗温度疲劳性能进行评估。

3 数据分析

3.1 弹性模量降低 35% 的加载循环次数

在常规加载疲劳试验中,加载频率为 10~50 Hz,试验终止准则为弹性模量降低 50% 或试样出现断裂。然而,由于某些试样的测试时间较长,在弹性模量降低到 50% 之前,持续加载循环是不可行的。所以不管试样是否断裂或者模量降低到 50%,试验条件均设定为加载 72 h。试验数据分析表明:在 72 h 内,大部分试件的弹性模量降低了 35%~50%。由于观察到所有试件的弹性模量降低均可达到 35%,因此在数据分析中也选取了与此水平对应的加载循环次数作为响应参数之一。图 6 为 3 种不同试样的弹性模量折减曲线。

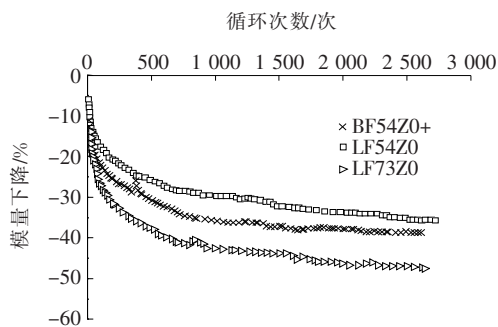


图6 3种试样弹性模量的降低曲线

由图 6 可知:曲线并非 S 形,表明在棱柱梁试样内存在均匀应变。

3.2 使用幂函数模型估计弹性模量减少 50% 的循环次数

除了评估弹性模量降低 35% 水平下的疲劳寿命,还对那些测试了 72 h 但模量减少没有达到 50% 的试样进行模量减少 50% 的加载循环次数的推算。使用幂函数模型进行外推,幂函数模型通常用下列关系来模拟与加载有关的疲劳寿命:

$$S = aN^b \quad (4)$$

式中: S 为第 N 次加载循环刚度; a, b 为疲劳常数。

为拟合式(4)中的幂函数模型,采用双对数坐标,将弹性模量的下降量绘制成加载循环次数的函数(图 7),从而可以区分在恒幅循环应变下表征疲劳特性的部分。

图 7 中,1 表示在前期循环时,由于集料骨架的剧烈变化,导致弹性模量下降速度加快,这是因为在试样上快速地施加了恒定的循环应变。3 表示在稳定阶段后弹性模量下降速率有所加快,这是因为试件内部裂

缝快速扩展。

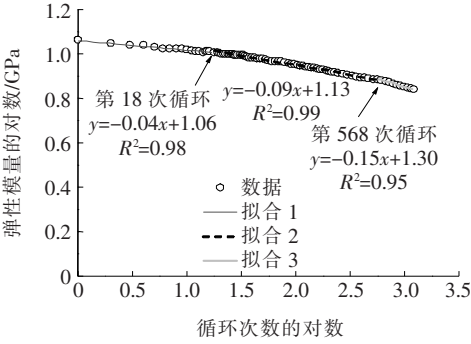


图 7 弹性模量与循环次数关系曲线

图 7 中 2 的拟合直线表示所选数据的最佳线性拟合。为了确定线性区域,编写了 Matlab 代码,这也方便了模型常数的计算。找到最佳线性区域后(即弹性模量平稳降低的疲劳特性区域),对式(4)中的模型进行拟合,如图 8 所示,可以推断出每个试件的弹性模量降低 50%的加载循环次数。

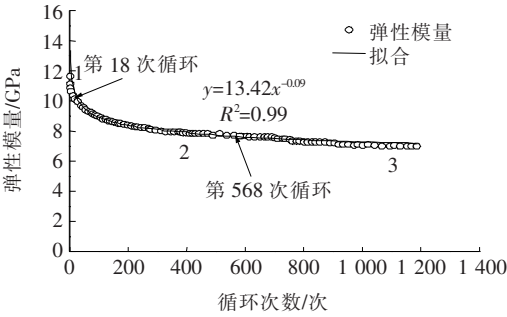


图 8 幂函数模型拟合模量下降 50%

3.3 弹性模量的下降速率

另一个响应参数是由式(4)中的幂函数模型计算得到的斜率常数 b ,即弹性模量的降低速率,就是双对数坐标下的斜率(图 7),斜率常数实际上代表疲劳试验过程中的裂缝扩展发展状态,可以有效地用来表征沥青混凝土的疲劳性能。如表 5 所示,该参数也作为方差统计分析中的响应变量之一。

4 结果与讨论

对表征沥青混凝土试件温度疲劳性能的响应参数进行方差分析。需要说明的是,由于个别试件在制备过程中出现了错位问题,导致试件测试不成功,所以有些试件只进行了 2 次平行试验而不是 3 次。在 95%置信水平的方差分析中也考虑了这些数据点。所有试件的统计分析结果如表 6 所示。

表 6 响应参数的方差结果

响应参数	方差				
	集料类型	级配	沥青种类	是否改性	沥青含量
弹性模量降低 35%	0.069	0.618	0.062	0.321	0.005
弹性模量降低 50%	0.053	0.528	0.584	0.105	0.023
弹性模量降低速率	0.002	0.333	0.084	0.641	0.061

注:概率水平 $P < 0.05$ 。

影响沥青混凝土试件温度疲劳性能的重要混合料设计变量可以通过观察在选定 $(1-\alpha) = 0.95$ 显著水平下的概率 P 值来确定。从表 6 可以看出:第一个响应参数是使弹性模量降低 35%时的加载次数。可以看出该响应参数下的重要混合料设计变量是沥青含量,其概率水平为 0.005。而集料类型和沥青结合料类型也对温度疲劳性能有较大影响,概率值分别为 0.069 和 0.062,仍接近 5%的概率水平。

图 9 为沥青含量对模量下降 35%时循环次数的影响。

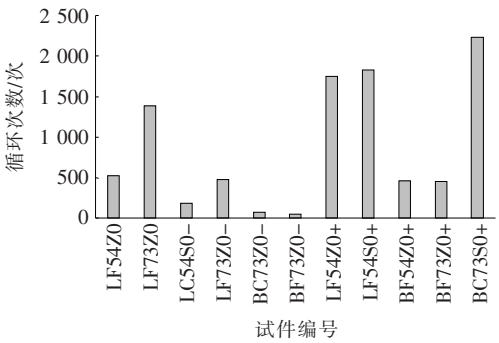


图 9 模量下降 35%的循环次数

由图 9 可以看出:最佳沥青含量 -0.5%的试件弹性模量降低 35%时的加载循环次数比最佳沥青含量 +0.5%的试件更少。这一趋势表明:随着黏结剂掺量的增加,集料颗粒间黏结性能得到改善,从而提高了混合料的刚度,沥青混凝土的疲劳寿命得到提高。

从表 6 还可以看到:混合设计变量对弹性模量降低 50%时的影响。对于这些响应参数,沥青含量也是影响温度疲劳性能最明显的参数,其概率水平为 0.023,这个概率值低于第一个响应参数的概率值。说明沥青含量对温度疲劳性能的影响显著。图 10 为沥青含量对模量下降 50%时循环次数的影响。

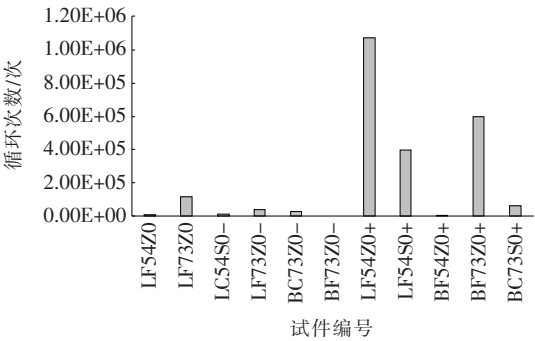


图 10 模量下降 50% 的循环次数

由图 10 可以看出:除了 BF54ZO+ 试件外,图 10 也表现出如图 9 所示类似的趋势。然而,与模量降低 35% 的加载次数相比,最佳沥青含量 +0.5% 比最佳沥青含量 -0.5% 的试件,在模量减少 50% 的加载周期上差异似乎更加明显。对于第二个响应变量,集料类型影响的 P 值为 0.053,略高于 5%,这也表明集料类型对模量降低的影响与沥青含量的影响相当,在配合比设计中应考虑抵抗温度疲劳的性能。

第 3 个响应参数(b)是双对数坐标中弹性模量—加载循环次数的斜率,表示试样弹性模量的降低速率。该参数的方差分析结果见表 6 最后一列。由表 6 可以看出:集料类型是抗疲劳最重要的因素,其概率水平为 0.002。试验方案中使用的集料包括石灰石和玄武岩,在高频载荷相关的常规疲劳试验中,这两种集料通常表现出明显的混合料性能。然而,该试验采用非常低的频率加载条件下,集料类型似乎成为了主要影响因素(图 11)。

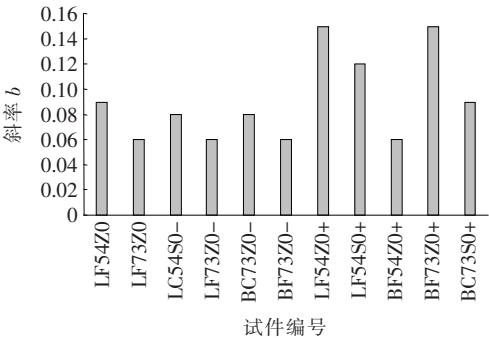


图 11 试样模量的下降速率

由图 11 可以看出:玄武岩集料的弹性模量降低速率高于石灰石,这是因为石灰石与黏结剂的结合比玄

武岩要好,因此会导致混合料具有更高的抗拉强度。在之前的研究中,这些集料被用于研究低温开裂时,也发现了类似的结果。对于该响应变量,尽管计算的概率水平小于 5%,但沥青含量对温度疲劳有一定的影响,其概率水平为 0.061,只是这种影响不像其他响应参数那么强烈。

5 结论

为了测定沥青混凝土的温度疲劳性能,对 TSRST 试验机进行了改进,将恒幅正弦加载法应用于沥青混凝土梁试件上。最大应变水平是通过测量的温度系数和安卡拉市 10℃ 的温差确定的。对试验数据进行统计分析,找出影响试验混合料温度疲劳性能的重要混合设计变量。得出以下结论:

- (1) 随着沥青含量增加,即使弹性模量降低 35% 和 50%,其加载次数也在增加。表明沥青含量的增加提高了混合料的温度疲劳性能。沥青含量是影响沥青混凝土温度疲劳性能的一个重要因素。
- (2) 在相同的混合料弹性模量降低水平下,石灰岩比玄武岩具有更高的加载循环次数。
- (3) 虽然统计分析没有表明集料类型是弹性模量降低 35% 和 50% 的一个重要因素,但考虑到该因素的计算概率值,表明集料类型对混合料温度疲劳性能有一定的潜在影响。因此,需要进一步研究该因素对沥青混凝土温度疲劳性能的影响。
- (4) 沥青是否改性这一因素的计算概率值比较大,表明沥青是否改性对混合料的温度疲劳影响较小。
- (5) 单轴控制幅度的循环应变是测量沥青混凝土抗温度疲劳性能的可行方法,因为其弹性模量的下降曲线类似于传统的刚度与荷载加载循环次数的关系。
- (6) 根据研究结果可以推广到概率值接近 5% 的混合料设计变量。这样,就有可能通过减轻现场温度疲劳现象来设计耐久性路面的沥青混合料。

——编译自: Ali Arabzadeh, Murat Guler. Thermal Fatigue Behavior of Asphalt Concrete: A Laboratory-Based Investigation Approach[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 229—236.