

加载次序对沥青混合料疲劳损伤累积的影响

房辰泽^{1,2}, 郭乃胜¹, 蒋继望^{2,3}, 冷 真^{2,✉}, 李 辉^{2,3}, 陆国阳², 王昊鹏⁴

1 大连海事大学交通运输工程学院,辽宁 大连 116026

2 香港理工大学土木及环境工程学系,香港 九龙 999077

3 东南大学交通学院,南京 21009

4 诺丁汉大学诺丁汉交通工程中心,英国 诺丁汉 NG7 2RD

沥青混合料在变幅加载下的疲劳损伤累积过程具有明显的非线性特征,然而传统的线性损伤累积准则无法表征不同加载次序下的非线性疲劳损伤累积(NLFDA)。为研究加载次序对沥青混合料疲劳损伤累积的影响,首先开展恒幅加载疲劳试验,分析恒幅加载下的疲劳损伤累积规律;其次借助变幅加载疲劳试验,分析变幅加载下的疲劳损伤累积规律;最后建立考虑加载次序的NLFDA模型,分析加载次序对沥青混合料疲劳损伤累积的影响。结果表明:恒幅加载下沥青混合料疲劳损伤发生非线性演化,但服从线性损伤累积准则,且累积寿命分数为1;变幅加载会导致疲劳损伤发生非线性演化,且服从非线性损伤累积准则,低·高·高·低加载次序的累积寿命分数分别大于1和小于1;建立的NLFDA模型可较为准确地表征沥青混合料疲劳损伤对加载次序的依赖性。

关键词 道路工程 疲劳损伤累积 加载次序 沥青混合料

中图分类号:U414 文献标识码:A

Effects of Loading Sequence on Fatigue Damage Accumulation of Asphalt Mixture

FANG Chenze^{1,2}, GUO Naisheng¹, JIANG Jiwang^{2,3}, LENG Zhen^{2,✉}, LI Hui^{2,3}, LU Guoyang², WANG Haopeng⁴

1 Department of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China

2 Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon 999077, Hong Kong, China

3 Department of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China

4 Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK

The accumulation process of fatigue damage of asphalt mixture under variable amplitude loading exhibits an obvious nonlinear characteristic. However, the traditional linear damage accumulation criterion fails to characterize the nonlinear fatigue damage accumulation (NLFDA) under different loading sequences. This study aims to investigate the effects of loading sequence on the fatigue damage accumulation of asphalt mixture. First, the fatigue tests with constant amplitude loading were carried out to investigate the fatigue damage accumulation under constant amplitude loading. Then, the SCB fatigue tests with variable amplitude loading were conducted to analyze the fatigue damage accumulation under variable amplitude loading. Finally, the NLFDA model considering the loading sequence was established to analyze the effects of loading sequence on the fatigue damage accumulation of asphalt mixture. It was found that the fatigue damage of asphalt mixture under constant amplitude loading evolved nonlinearly, however, it obeyed linear damage accumulation criterion and the cumulative life fractions are equal to one. The variable amplitude loading can lead to that the fatigue damage evolves nonlinearly and obeys nonlinear damage accumulation criterion, and the cumulative life fractions of the loading sequences of low-high and high-low are greater than one and less than one, respectively. The established NLFDA model can effectively characterize the dependence of the fatigue damage of asphalt mixture on the loading sequence.

Key words road engineering, fatigue damage accumulation, loading sequence, asphalt mixture

0 引言

沥青路面在车辆荷载的循环作用下会产生疲劳损伤,准确揭示路面材料的疲劳损伤累积规律,对提升路面的使用性能及延长路面疲劳寿命有着重要的科学意义^[1-2]。通常,学者们将不同的车辆荷载转化为等幅循环荷载,依据 Miner's 线性损伤累积准则设计路面结构^[3-4]。然而,由于车辆的类型、轴重、轴载等因素存在差异,路面结构受到变幅荷载的循环作用。尽管 Miner's 准则在道路工程领域得到了广泛的应用,但其无法表征变幅加载次序对疲劳损伤的影响^[5-6]。不同荷载幅值的重新排序会导致疲劳寿命发生变化,这种现象称为加载次序效应^[7]。

现阶段,有关加载次序效应的研究主要在金属材料领域。Marco 和 Starkey^[8]提出的非线性疲劳损伤累积理论为研

究加载次序效应提供了理论依据。Manson 等^[9]和 Ye 等^[10]采用非线性疲劳损伤累积理论分别研究了加载次序对金属材料的裂纹长度演化和韧性衰减规律的影响。Mesmacque 等^[11]和 Kwofie^[12]等分别采用损伤应力增量和疲劳驱动应力研究了疲劳损伤对加载次序的依赖性。金属领域的相关研究对分析沥青混合料的加载次序效应具有较强的借鉴意义。吴志勇^[13]通过开展变幅四点弯曲疲劳试验,研究了沥青混合料劲度模量在变幅加载下的衰减规律。Jiang 等^[14]通过开展多级重复加载试验,研究了加载次序对沥青混合料蠕变变形累积的影响。Cai 等^[15]通过分析应力控制和应变控制下的疲劳寿命规律,证明了沥青混合料的损伤演化依赖于加载次序。上述研究为分析变幅加载下路面材料的力学响应提供了初步的理论依据,但对变幅加载下疲劳损伤的非线性累积过程缺乏系统深入的理论分析。

基金项目:国家自然科学基金(52108421;51308084)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (52108421, 51308084).

传统的线性损伤累积准则忽略了加载次序对损伤累积过程的重要影响,导致预测的疲劳性能存在理论误差^[16-17]。因此,本研究旨在通过开展变幅加载疲劳试验,建立考虑加载次序影响的非线性损伤累积模型,分析沥青混合料疲劳损伤对加载次序的依赖性。

1 实验

1.1 材料及试件制备

选用沥青为苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(Styrene-butadiene-styrene,SBS)嵌段共聚物改性沥青,根据规程JTG E20-2011^[18]测试其技术指标,结果如表1所示。集料为香港地区常用的花岗岩,混合料类型为沥青玛蹄脂碎石(Stone mastic asphalt,SMA)混合料,集料级配如表2所示。沥青含量和空隙率分别为6%和4%。采用旋转压实仪成型直径和高度均为150 mm的圆柱形沥青混合料试件,并将其切割成直径和厚度分别为150 mm和50 mm的半圆试件,如图1a所示。

表1 沥青技术指标

Table 1 Technical properties of asphalt binder

指标	结果
针入度(25℃)/(0.1 mm)	46
软化点/℃	93
黏度(135℃)/(mPa·s)	2 450
闪点/℃	316
溶解度/%	99.97
弹性恢复(135℃)/%	94

表2 集料级配

Table 2 Aggregate gradation

成分	相对密度/(g/cm ³)	尺寸/mm	通过百分率/%
粗级料	2.642	14~10	3.5
	2.663	10~5	59.5
	2.709	5~2.36	9.0
细级料	2.649	2.36~0.075	16.5
填料	2.661	<0.075	9.5
石灰	2.587		2.0

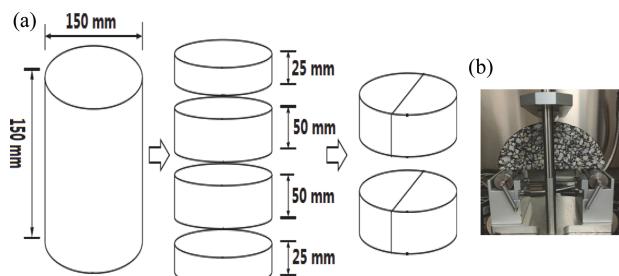


图1 (a) 试件制备和(b) 加载模具

Fig. 1 (a) Specimens fabrication and (b) loading mould

1.2 试验方法

半圆弯曲(Semi-circular bending,SCB)试验的试件制备过程相对简单,有较为良好的可重复性,且在道路工程领域得到了较为广泛的应用^[16,19-20],故采用SCB试验分析加载次序对疲劳损伤累积的影响。开展SCB恒幅和变幅加载疲劳

试验,分析恒幅和变幅加载下的沥青混合料疲劳损伤累积规律。温度均采用25℃的中温条件,试验设备为DTS-30加载装置。本研究所开展强度试验、恒幅加载疲劳试验、变幅加载疲劳试验的平行试件个数为三个,相应试验结果取三次平行试验的平均值。

1.2.1 SCB 恒幅加载疲劳试验

试件底部的模具支座设计成可水平滑动的圆柱体用以支撑试件,且支点间距满足0.8倍试件直径,如图1b所示。根据规程AASHTO TP124^[19],以50 mm/min的速率加载至试件断裂,测量试件的强度(σ_{\max}), σ_{\max} 结果取三次平行试验的平均值。解析解能近似地确定SCB试件的力学响应,其中,Gourab Saha^[16]建议的解析解如式(1)—式(3)所示,其有较好精确度。本研究根据式(1)—式(3)近似地确定SCB试件的横向拉伸应力、拉伸应变及劲度模量。选取疲劳寿命适中(试验耗时适中)的两个应力比(0.190和0.135),得到疲劳试验的高荷载幅值(σ_{high})和低荷载幅值(σ_{low}),即 $\sigma_{\text{high}}=0.190\sigma_{\max}, \sigma_{\text{low}}=0.135\sigma_{\max}$ 。

$$\sigma = \frac{6lF}{t\Omega^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 0.807 \frac{\delta_v}{\Omega} \quad (2)$$

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: σ 为横向拉伸应力解析解,kPa; l 为支点间距,mm; F 为力,N; t 为厚度,mm; Ω 为直径,mm; ε 为横向拉伸应变解析解; δ_v 为竖向位移,mm; S 为劲度模量解析解,kPa。

启动DTS-30的重复加载程序,分别选择 σ_{high} 和 σ_{low} 作为荷载幅值,施加频率为10 Hz的半正弦循环荷载,直至SCB试件疲劳断裂,相应疲劳寿命(N_f)结果取三次平行试验的平均值,如表3所示。重复加载期间SCB试件的开裂过程如图2所示。由图2可知,沥青混合料试件底部中央的疲劳裂纹向上扩展至材料结构完全失效。这是因为:施加的荷载幅值大于非线性粘弹性临界值,导致表面能、耗散伪应变能、恢复伪应变能三者满足裂纹萌生准则,萌生的疲劳裂纹在循环荷载下不断扩展^[21-23]。

表3 恒幅加载下的疲劳寿命

Table 3 Fatigue life under constant amplitude loading

参数	平均值	标准差	变异系数/%
σ_{\max} /MPa	5.312	0.203	3.823
σ_{low} 的疲劳寿命/次	57 889	2 071.811	3.579
σ_{high} 的疲劳寿命/次	16 033	647.021	4.036

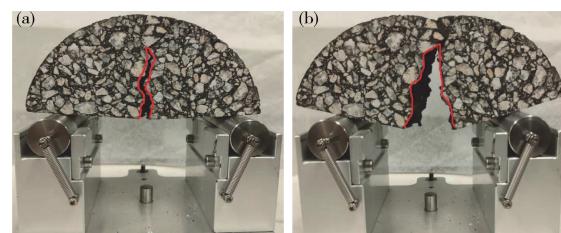


图2 SCB 疲劳试验的开裂过程:(a) 初始开裂、(b) 疲劳失效

Fig. 2 Cracking process of SCB fatigue test: (a) initial cracking, (b) fatigue failure

1.2.2 SCB 变幅加载疲劳试验

变幅加载疲劳试验的荷载波形及频率均与恒幅加载疲劳试验保持一致^[24-25]。选择如图 3 所示的高-低($\sigma_{\text{high}}-\sigma_{\text{low}}$)和低-高($\sigma_{\text{low}}-\sigma_{\text{high}}$)两种加载次序,开展 SCB 变幅加载疲劳试验。 $\sigma_{\text{high}}-\sigma_{\text{low}}$ 和 $\sigma_{\text{low}}-\sigma_{\text{high}}$ 分别对应于“重车先行、轻车后行”和“轻车先行、重车后行”的行驶工况。加载步骤为:(1)采用一级荷载幅值(σ_1),对试件进行 N_1 次加载;(2)采用二级荷载幅值(σ_2),对试件加载 N_2 次至疲劳破坏。本研究将 N_1/N_f 、 N_2/N_f 、 $N_1/N_f+N_2/N_f$ 分别定义为一级寿命分数、二级寿命分数、累积寿命分数、累积疲劳寿命。累积疲劳寿命结果取三次平行试验的平均值,如表 4 所示。 N_f 和 N_f 分别为 σ_1 和 σ_2 对应的恒幅加载寿命, N_1/N_f 分别取 0、0.15、0.3、0.6、1。 $\sigma_{\text{high}}-\sigma_{\text{low}}$ 加载次序对应的 σ_1 和 σ_2 分别为 σ_{high} 和 σ_{low} , $\sigma_{\text{low}}-\sigma_{\text{high}}$ 加载次序对应的 σ_1 和 σ_2 分别为 σ_{low} 和 σ_{high} 。

表 4 变幅加载疲劳试验的累积疲劳寿命结果

Table 4 Cumulative fatigue life of variable amplitude fatigue test

加载次序	N_1/N_f	累积疲劳寿命 平均值/次	标准差	变异系数 %
$\sigma_{\text{low}}-\sigma_{\text{high}}$	0	16 033	647.021	4.036
	0.15	24 409	1 118.508	4.582
	0.3	32 734	1 293.565	3.952
	0.6	48 273	1 398.010	2.896
	1	57 889	2 071.811	3.579
$\sigma_{\text{high}}-\sigma_{\text{low}}$	0	57 889	2 071.811	3.579
	0.15	45 665	1 495.556	3.275
	0.3	40 580	1 099.558	2.710
	0.6	30 923	899.594	2.909
	1	16 033	647.021	4.036

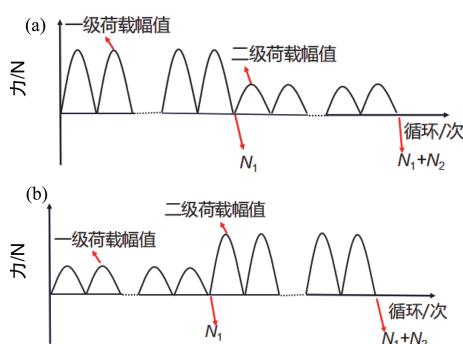


图 3 SCB 变幅加载疲劳试验的加载示意图;(a) $\sigma_{\text{high}}-\sigma_{\text{low}}$ 加载次序、(b) $\sigma_{\text{low}}-\sigma_{\text{high}}$ 加载次序

Fig. 3 Schematic of SCB fatigue test with variable amplitude; (a) $\sigma_{\text{high}}-\sigma_{\text{low}}$ sequence, (b) $\sigma_{\text{low}}-\sigma_{\text{high}}$ sequence

2 加载次序对沥青混合料疲劳损伤累积的影响

2.1 恒幅加载下沥青混合料的疲劳损伤累积

沥青混合料在荷载的循环作用下萌生疲劳损伤,不断演化的疲劳损伤会导致材料强度逐渐衰减,当衰减后的材料强度低于荷载幅值时发生疲劳破坏。本研究采用劲度模量的

衰减值与初始值之比表征疲劳损伤(D)^[26-28],如式(4)所示。两种荷载幅值的疲劳损伤曲线如图 4 所示,由图 4 可知,应力控制模式下恒幅加载的沥青混合料疲劳损伤呈非线性演化趋势:损伤在占比微小的第一和第三阶段均呈现出较大的演化速率,损伤演化过程主要由演化速率稳定的第二阶段组成。当荷载幅值由 σ_{high} 减小至 σ_{low} 后,损伤曲线斜率显著变缓,这表明恒幅加载下沥青混合料的疲劳损伤发生非线性演化,损伤演化速率显著依赖于荷载幅值且两者呈正相关。

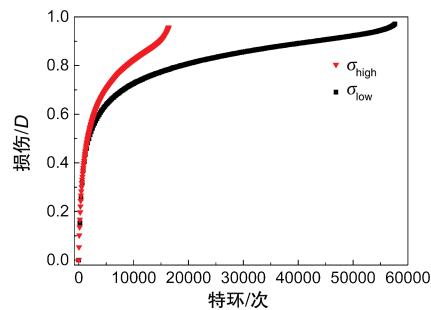


图 4 恒幅荷载下的疲劳损伤曲线

Fig. 4 Fatigue damage curves under constant amplitude loading

$$D = \frac{S_0 - S_N}{S_0} \quad (4)$$

式中: S_0 与 S_N 分别为初始循环与第 N 个循环荷载峰值处的劲度模量解析解,kPa。

图 5 为恒幅加载下沥青混合料的疲劳损伤累积路径示意图,该路径可以简述为:荷载作用 N_1 次的累积路径为 oa ,之后荷载作用 N_2 次至失效的累积路径为 ab ,则恒幅加载下的损伤累积路径为 $oa-ab$ 。理论上,恒幅加载疲劳试验可等效为一级和二级荷载幅值相等的变幅加载疲劳试验。两种荷载幅值对应的疲劳寿命均为 N_f ,将恒幅加载下的一级寿命分数、二级寿命分数、累积寿命分数分别定义为 N_1/N_f 、 N_2/N_f 、 $N_1/N_f+N_2/N_f$ 。恒幅加载下沥青混合料的寿命分数结果如图 6 所示,由图 6 可知,沥青混合料的二级寿命分数随一级寿命分数的增大而线性减小,且累积寿命分数始终为 1,这与式(5)所示的线性损伤累积准则一致^[6-8,29-30]。这表明恒幅加载下沥青混合料的疲劳损伤发生非线性演化,但服从线性损伤累积准则^[6-8,29-30]。

$$\frac{N_2}{N_f} = 1 - \frac{N_1}{N_f} \quad (5)$$

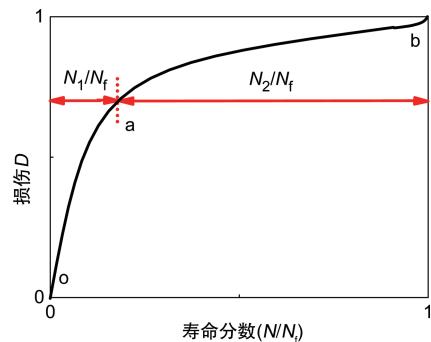


图 5 恒幅加载下的疲劳损伤累积路径示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fatigue damage accumulation path under constant amplitude loading

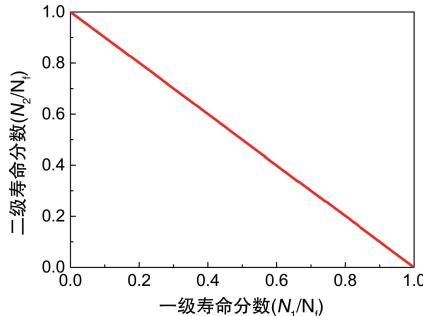


图 6 恒幅加载下的寿命分数

Fig. 6 Life fractions under constant amplitude loading

2.2 加载次序对沥青混合料疲劳损伤累积的影响

不同加载次序下累积疲劳寿命结果如图 7 所示,其反映了变幅加载下沥青混合料的整体疲劳损伤特性。由图 7 可知, $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 次序下的累积疲劳寿命随 N_1/N_f 的增大逐渐地增大, $\sigma_{high}-\sigma_{low}$ 次序下的累积疲劳寿命随 N_1/N_f 的增大逐渐减小。以 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 次序为例分析加载次序对沥青混合料疲劳寿命的影响,沥青混合料的疲劳损伤演化速率与荷载幅值呈正相关。 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 次序的加载过程为:先采用低荷载幅值 (σ_{low}) 进行 N_1 次一级加载至 N_1/N_f ,然后采用高荷载幅值 (σ_{high}) 进行 N_2 次二级加载至疲劳破坏。相较于 σ_{high} 对应的恒幅加载, $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 次序在一级加载过程中引入了 σ_{low} ,期间,引入的 σ_{low} 降低了损伤的整体演化速率,沥青混合料在单位循环内累积的损伤减小。随着 N_1/N_f 的增加,累积相同损伤则需要更多的荷载循环,导致损伤演化至其失效阈值对应的累积疲劳寿命愈大。同理,当加载次序由 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 变为 $\sigma_{high}-\sigma_{low}$ 后,累积疲劳寿命随 N_1/N_f 的增加而逐渐缩短^[10,29]。上述分析表明:变幅加载下沥青混合料的疲劳损伤特性显著依赖于加载次序。

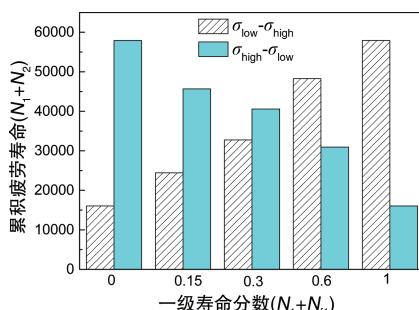
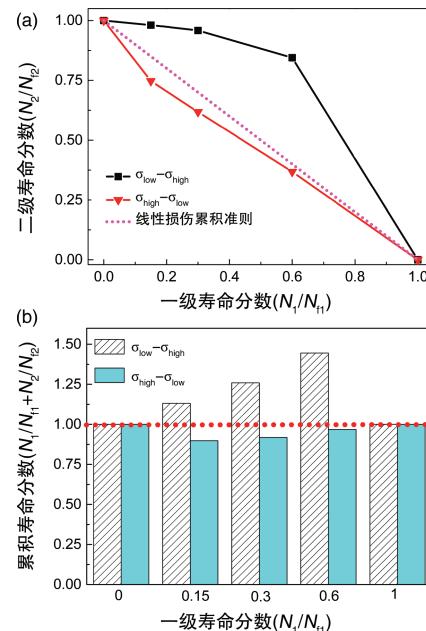


图 7 不同加载次序的疲劳寿命

Fig. 7 Fatigue life under different loading sequences

图 8 为变幅加载下沥青混合料的寿命分数结果,图 8a 中虚线代表线性损伤累积准则,数据点与虚线完全重合表明累积寿命分数等于 1,数据点位于虚线上侧和下侧分别表明累积寿命分数大于 1 和小于 1。由图 8a 可知,随着沥青混合料的一级寿命分数由 0 增加至 1,二级寿命分数由 1 非线性减小至 0。 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 和 $\sigma_{high}-\sigma_{low}$ 加载次序的二级寿命分数点分别位于线性损伤累积准则虚线的上侧和下侧,导致如图 8b 所示的累积寿命分数分别大于 1 和小于 1。上述结果表明:线性损伤累积准则无法准确地表征变幅加载下沥青混合料的疲劳损伤累积,沥青混合料在变幅加载下发生非线性疲劳损伤累积^[6-8,29-30]。因此,应建立考虑加载次序影响的非线性

损伤累积模型,以表征沥青混合料疲劳损伤累积对加载次序的依赖性。

图 8 不同加载次序的寿命分数:(a)二级寿命分数、(b)累积寿命分数
Fig. 8 Life fractions under different loading sequences: (a) second life fractions, (b) cumulative life fractions

3 考虑加载次序影响的沥青混合料非线性疲劳损伤累积模型

3.1 变幅加载下沥青混合料的疲劳损伤累积路径分析

相关研究^[6-11]表明,损伤等效准则可较为合理地描述变幅加载下的疲劳损伤累积路径。因此,本工作基于损伤等效准则研究沥青混合料在变幅加载下的疲劳损伤累积路径。沥青混合料在变幅加载下的疲劳损伤累积路径如图 9 所示,其中曲线 OAC 和 OA' C 分别为 σ_{low} 和 σ_{high} 对应的恒幅加载疲劳损伤累积路径。以 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 次序为例,分析加载次序对疲劳损伤累积的影响。一级加载过程中 σ_{low} 作用 N_1 次的损伤累积路径为 OA,根据损伤等效准则,A 点损伤等效为 σ_{high} 作用 N_2' 次至 A' 点产生的损伤,之后 σ_{high} 作用 N_2 次完成二级加载至 C 点,则该模式下的损伤累积路径为 OA-A' C。A 和 A' 点寿命分数分别为 N_1/N_f 和 N_2'/N_f ,由于 σ_{low} 小于 σ_{high} 恒幅加载的损伤演化速率,导致 N_1/N_f 大于 N_2'/N_f ,且 $N_1/N_f - N_2'/N_f = \Delta N/N_f$ 。

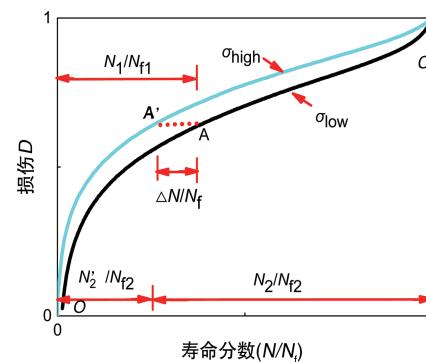


图 9 变幅加载下的疲劳损伤累积路径示意图

Fig. 9 Schematic diagram of fatigue damage accumulation under variable amplitude loading

$N_2'/N_{f2} = \Delta N/N_f$ 。则 $N_1/N_{f1} + N_2'/N_{f2} = 1 + \Delta N/N_f$, 即 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 次序下的累积疲劳寿命分数大于 1, 同理 $\sigma_{high}-\sigma_{low}$ 次序下的累积寿命分数小于 1^[11]。当疲劳损伤不依赖于加载次序时会发生线性累积, 累积寿命分数为 1。变幅加载下沥青混合料的累积寿命分数不等于 1, 表明变幅加载会影响沥青混合料的疲劳损伤使其发生非线性累积^[28-31]。

3.2 考虑加载次序影响的沥青混合料非线性疲劳损伤累积模型

Chabaoche^[17]通过不可逆的热力学理论基础, 建立了具有物理解释的连续损伤力学模型。相关研究^[17,24]表明, Chabaoche 模型可通过描述荷载幅值水平对疲劳损伤的影响, 从而较准确地表征疲劳损伤累积对加载次序的依赖性。本研究中 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 和 $\sigma_{high}-\sigma_{low}$ 两种加载次序是荷载幅值变化引起的, 因此采用 Chabaoche 模型研究变幅加载下的疲劳损伤累积^[17,24]。采用 Chabaoche 模型(见式(6))可较为准确地描述沥青及混合料的疲劳损伤演化规律。

$$\frac{dD}{dN} = [1 - (1 - D)^{1+\beta}]^\alpha \left[\frac{\sigma}{M(1 - D)} \right]^\beta \quad (6)$$

式中: D 为损伤变量; β 和 M 是与温度相关的模型参数; α 是依赖于温度和荷载幅值的模型参数; σ 是荷载幅值。

在 $D \in [0, 1]$ 与 $N \in [0, N_f]$ 区间内对式(6)积分, 得到材料结构失效的疲劳寿命, 如式(7)所示。

$$N_f = \frac{1}{(1 + \beta)(1 - \alpha)} \left(\frac{\sigma}{M} \right)^{-\beta} \quad (7)$$

在 $D \in [0, 1]$ 与 $N \in [0, N_f]$ 区间内对式(6)积分, 得到:

$$N = \frac{1}{1 - \alpha} \frac{1}{1 + \beta} \left[\frac{\sigma}{M_0} \right]^{-\beta} [1 - (1 - D)^{1+\beta}]^{1-\alpha} \quad (8)$$

式(8)除以式(7), 得到含有 N/N_f 的损伤模型:

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{1/(1-\alpha)} \right]^{1/(1+\beta)} \quad (9)$$

基于损伤等效准则, 一级荷载幅值作用 N_1 次产生的损伤状态等效为二级荷载幅值作用 N_2' 次产生的损伤状态, 如式(10)所示^[10-11]。

$$f(\sigma_1, N_1/N_{f1}) = f(\sigma_2, N_2'/N_{f2}) \quad (10)$$

式中: N_2' 满足 $N_2' + N_2 = N_{f2}$ 。

联立式(9)和式(10), 得到^[9,17,31]:

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{N_1}{N_{f1}} \right)^{1/(1-\alpha_1)} \right]^{1/(1+\beta)} \\ = 1 - \left[1 - \left(\frac{N_2'}{N_{f2}} \right)^{1/(1-\alpha_2)} \right]^{1/(1+\beta)} \quad (11)$$

式中: α_1 和 α_2 分别为一级和二级荷载幅值对应的恒幅加载的模型参数。

由此建立的考虑加载次序作用的非线性疲劳损伤累积模型如式(12)所示^[9,17,31]。

$$\frac{N_2}{N_{f2}} = 1 - \left(\frac{N_1}{N_{f1}} \right)^\gamma \quad (12)$$

式中: $\gamma = (1 - \alpha_2)/(1 - \alpha_1)$ 。 β 是与温度相关且独立于荷载幅值的参数, 可以选用 γ 表征加载次序对疲劳损伤累积的影响^[9,17,31]。当 $\gamma = 1$ 时, 该模型退化为线性损伤累积模型, 无法表征沥青混合料疲劳损伤累积对加载次序的依赖性。

采用式(12)匹配二级疲劳寿命分数结果, 结果如图 10 所示。图 10 中的虚线对应的 γ 为 1, 表明疲劳损伤服从线性损伤累积准则发生线性累积, 且累积寿命分数等于 1。 $\sigma_{low}-\sigma_{high}$ 次序会降低沥青混合料的疲劳损伤演化速率, 导致疲劳损伤发生非线性累积, γ 大于 1(等于 3.569), 相应的数据点分布于累积寿命分数大于 1 的虚线上侧。 $\sigma_{high}-\sigma_{low}$ 次序会增加沥青混合料的疲劳损伤演化速率, 导致疲劳损伤发生非线性累积, γ 小于 1(等于 0.794), 相应的数据点分布于累积寿命分数小于 1 的虚线下侧^[9-12]。尽管该模型源自于 Chabaoche 损伤模型^[17], 且多用于金属材料领域, 但其对研究沥青混合料的疲劳损伤特性仍具有一定的借鉴意义。为验证所建模型的有效性, 其他工况保持不变, 开展试验条件如表 5 所示的两组变幅加载疲劳试验, 并将二级寿命分数的试验结果与预测结果对比, 相对误差分别为 7.484% 和 6.770%, 表明所建模型可以较为准确地表征变幅加载下沥青混合料的非线性疲劳损伤累积。

表 5 二级寿命分数结果对比

Table 5 Comparison of second life fractions

加载次序	N_1/N_{f1}	试验值	预测值	相对误差/%
$\sigma_{high}-\sigma_{low}$	0.4	0.481	0.517	7.484
$\sigma_{low}-\sigma_{high}$	0.4	0.901	0.962	6.770

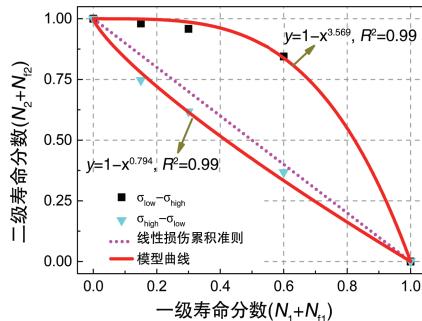


图 10 非线性疲劳损伤累积模型匹配结果

Fig. 10 Matching results of nonlinear fatigue damage accumulation model

值得注意的是, 沥青混合料是由粗集料、沥青胶浆、沥青砂浆和空隙组成的一种粘弹塑性多相非均质材料, 其内部结构的不规则性及内部成分的复杂力学性质导致其损伤机理极为复杂。本研究基于沥青混合料 SCB 疲劳试验所得的结论是否适用于其他试验方法, 仍需开展其他相关疲劳试验加以严格验证。此外, 沥青混合料发生非线性疲劳损伤累积, 主要源自于沥青材料的非线性疲劳损伤特性^[20,32]。可以合理推断, 本研究在沥青混合料尺度所得的结论依然适用于其他尺度(沥青胶浆和沥青砂浆尺度)。但仍需开展沥青胶浆和沥青砂浆的疲劳试验加以严格验证, 以实现对多尺度下沥青混合料非线性疲劳损伤特性的准确评价。

4 结论

(1) 恒幅加载下沥青混合料的疲劳损伤发生非线性演化, 但服从线性损伤累积准则, 且累积寿命分数为 1。

(2) 低-高-低加载次序会分别降低和增加沥青混合料疲劳损伤演化至阈值的速率, 导致两种次序的疲劳寿命随一级寿命分数的增大而分别增加和减小。

(3) 变幅加载会导致沥青混合料的疲劳损伤发生非线性演化,且服从非线性损伤累积准则,低-高和高-低加载次序的累积寿命分数分别大于1和小于1。

(4) 建立的非线性疲劳损伤累积模型可较为准确地表征沥青混合料疲劳损伤累积对加载次序的依赖性。

参考文献

- 1 Zhou X D, Chang C Q, Wang L. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3), 650 (in Chinese). 周晓东,常春清,王岚. 建筑材料学报, 2020, 23(3), 650.
- 2 Cui Y N, Zhang Q, Zhang X. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(1), 85 (in Chinese). 崔亚楠,张强,张翔. 建筑材料学报, 2023, 26(1), 85.
- 3 Fang C Z, Guo N S, You Z P, et al. *Construction and Building Materials*, 2020, 257, 119476.
- 4 Zhang J, Wang Y D, Su Y T. *Construction and Building Materials*, 2019, 218, 712.
- 5 Fang C Z, Guo N S, Sun Y Z, et al. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(4), 196 (in Chinese). 房辰泽,郭乃胜,孙雅珍,等. 工程力学, 2020, 37(4), 204.
- 6 Zuo F J, Huang H Z, Zhu S P, et al. *International Journal of Damage Mechanics*, 2015, 24(5), 767.
- 7 Xu S, Zhu S P, Hao Y Z, et al. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2018, 53(8), 719.
- 8 Marco S M, Starkey W L. *Transactions of the ASME*, 1954, 76(4), 626.
- 9 Manson S S, Halford G R. *NASA Technical Memorandum 81517*, 1980, 49.
- 10 Ye D Y, Wang Z L. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23, 679.
- 11 Mesmacque G, Garcia S, Amrouche A, et al. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(4), 461.
- 12 Kwofie S, Rahbar N. *International Journal of Damage Mechanics*, 2013, 22(3), 393.
- 13 Wu Zhiyong. Research on cumulative fatigue damage of asphalt mixture and asphalt layer based on multi-level amplitude loading. Ph. D. Thesis, South China University of Technology, China, 2014 (in Chinese). 吴志勇. 基于多级等幅荷载下的沥青混合料损伤累积和沥青面层疲劳损伤破坏研究. 博士学位论文, 华南理工大学, 2014.
- 14 Jiang J W, Ni F J, Gao L, et al. *Construction and Building Materials*, 2016, 122, 254.
- 15 Cai X, Yang J. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2019, 35(1), 89.
- 16 Gourab S, Krishna P B. *Construction and Building Materials*, 2016, 105, 103.
- 17 Chaboche J L, Lesne P M. *Fatigue of Engineering Materials*, 1988, 2(1), 1.
- 18 JTG E20-2011. *Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering*, People's Communications Press files, China, 2011 (in Chinese). JTG E20-2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程, 人民交通出版社, 2011.
- 19 AASHTO TP124. *Standard practice for determining the fracture potential of asphalt mixtures using semicircular bend geometry (SCB) at intermediate temperature*, American Association of State Highways and Transportation Officials, 2016.
- 20 Jiang J W. Investigation of the fatigue property and internal structure of asphalt mixtures based on multiscale methods. Ph. D. Thesis, Southeast University, China, 2019 (in Chinese). 蒋继望. 多尺度视角下沥青混合料疲劳性能及微观结构研究. 博士学位论文, 东南大学, 2019.
- 21 Li H, Luo X, Zhang Y Q. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 245, 107566.
- 22 Li H, Luo X, Zhang Y Q. *International Journal of Fatigue*, 2021, 148, 106185.
- 23 Li Hui, Luo Xue, Zhang Yuqing. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10), 115 (in Chinese). 李辉,罗雪,张裕卿. 中国公路学报, 2020, 33(10), 115.
- 24 Zhang Z Y, Markus O. *International Journal of Fatigue*, 2019, 121, 181.
- 25 Shi C G, Cai X, Wang T L, et al. *Construction and Building Materials*, 2021, 300, 124275.
- 26 Sun Y Z, Fang C Z, Wang J C, et al. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(1), 108 (in Chinese). 孙雅珍,房辰泽,王金昌,等. 建筑材料学报, 2019, 22(1), 108.
- 27 Fang C Z, Guo N S, You Z P, et al. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(6), 1018 (in Chinese). 房辰泽,郭乃胜,尤占平,等. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(6), 1018.
- 28 Sun Y Z, Fang C Z, Wang J C, et al. *Materials*, 2018, 11(9), 1.
- 29 Guan H X. A research on viscoelastic fatigue damage model of asphalt mixture. Ph. D. Thesis, Central South University, China, 2005 (in Chinese). 关宏信. 沥青混合料粘弹性疲劳损伤模型研究. 博士学位论文, 中南大学, 2005.
- 30 Wang F W, Xie S F. *Highway Engineering*, 2017, 42(5), 267 (in Chinese). 王凤维,解松芳. 公路工程, 2017, 42(5), 267.
- 31 Dattoma V, Giancane S, Nobile r, et al. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28, 89.
- 32 Fang C Z, Leng Z, Guo N S, et al. *Engineering Mechanics*, 2022, 37, 1 (in Chinese). 房辰泽,冷真,郭乃胜,等. 工程力学, 2022, 37, 1.

(责任编辑 汪芸竹)



房辰泽,博士研究生,自2019年9月在大连海事大学和香港理工大学攻读博士学位,在郭乃胜教授和冷真教授的指导下进行道路工程领域研究。目前主要研究方向:多尺度下沥青混合料非线性疲劳损伤力学表征,以及路面结构性能预测等研究。截至2023年12月,发表学术论文33篇,其中,以第一作者/导师第一、本人第二作者发表论文15篇(SCI 6篇,EI 5篇),并获辽宁省优秀硕士毕业论文,授权发明专利2项。



冷真,通信作者,香港理工大学土木及环境工程学系终身副教授、博师研究生导师,道路研究所所长,碳中和资源工程研究中心副总监。先后在东南大学取得本科及硕士学位、在美国伊利诺伊大学香槟分校取得博士学位。主要研究方向包括:可持续与智慧铺面材料与技术,及交通基础设施无损检测。已发表SCI期刊论文100余篇。现任美国土木工程师学会大中华分会会长、国际铺面科学与工程学会副主席、国际华人基础设施工作者协会理事、世界交通运输大会沥青路面学科主席、香港交通研究学会理事、及香港公路学会理事;任期刊 *Journal of Cleaner Materials* 创刊主编, *Journal of Cleaner Production* (中科院一区期刊) 执行主编, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 和 *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements* 副主编,及其他多个SCI期刊编委。