

文章编号:1007-9629(2011)06-

浇注式沥青混凝土疲劳损伤分析

张 华^{1,2}, 钱觉时¹, 吴文军², 郝增恒², 王 民²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市智翔铺道技术工程有限公司, 重庆 400060)

摘要: 根据应力等效假设,以劲度模量作为浇注式沥青混凝土疲劳损伤参量,将浇注式沥青混凝土劲度模量损伤因子增量随加载次数的累积过程分为3个阶段,并将宏观力学性能发生剧烈变化的第3阶段定义为浇注式沥青混凝土疲劳裂缝出现区域.通过对不同温度下浇注式沥青混凝土疲劳损伤试验结果的分析,定义了浇注式沥青混凝土疲劳破坏时的损伤因子为临界损伤因子,分析得到了浇注式沥青混凝土疲劳破坏时临界损伤因子与疲劳寿命之间的幂函数关系,并应用其对浇注式沥青混凝土的损伤因子进行拟合,建立了考虑温度因素的疲劳损伤模型.

关键词: 浇注式沥青混凝土; 劲度模量; 疲劳损伤; 临界损伤因子; 疲劳损伤模型

中图分类号: 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.000

Analysis on Fatigue Damage of Gussasphalt Concrete

ZHANG Hua^{1,2}, QIAN Jue-shi¹, WU Wen-jun², HAO Zeng-heng², WANG Min²

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Chongqing Zhixiang Paving Technology Engineering Co., Ltd., Chongqing 400060, China)

Abstract: According to the stress equivalence assumption, the damage increment of stiffness modulus of gussasphalt concrete(GA) with the accumulation of loading number is divided into 3 stages in case of using stiffness modulus as a fatigue damage parameter. The third stage, which is characterized by the distinct change of mechanical property, is defined as the stage of fatigue cracking. Based on the character of fatigue damage of GA at different temperature, the critical damage factor(D_p) for GA was defined. It is shown that there is a power function relationship between D_p and fatigue life of GA when failure. Furthermore, a fatigue damage model, considering the influence of temperature, was established by fitting the fatigue damage of GA with an appropriate function.

Key words: gussasphalt concrete(GA); stiffness modulus; fatigue damage; critical damage factor (D_p); fatigue damage model

浇注式沥青混凝土(GA)是以施工工艺为分类标准而确定的一种沥青混凝土,结构上属于悬浮密级配.在220~240℃施工温度条件下,沥青混合料呈流淌状态,一般不需要碾压,只需用简单摊铺整平机具即可完成施工,并能达到规定的密实度和平整度.浇注式沥青混凝土具有拌和温度高、矿粉含量高、沥青含量高以及拌和时间长等特点,且对钢桥面

有较强的适应性,因此目前主要用于钢桥面铺装中^[1-2].浇注式沥青混凝土的抗疲劳破坏能力和结构行为不同于普通沥青混凝土,其疲劳破坏机理更为复杂,影响因素更多,而且各因素之间相互影响.因此,目前普遍适用于普通沥青混凝土的疲劳特性分析研究方法,不适合在具有高劲度模量的浇注式沥青混凝土中使用.要准确评价浇注式沥青混凝土的

抗疲劳性能,必须采用有效的疲劳特性分析方法.本文根据损伤力学原理与方法,以浇注式沥青混凝土试件在应变控制下的疲劳试验结果,建立疲劳损伤变量与疲劳寿命之间关系(疲劳损伤方程),以期建立浇注式沥青混凝土疲劳性能的判断方法,更准确地评价浇注式沥青混凝土的抗疲劳性能.

1 浇注式沥青混凝土疲劳损伤参量选择与计算

1.1 疲劳损伤参量的选择

沥青混凝土疲劳损伤研究的前提是选择可用的损伤参量.从疲劳的观点来看,沥青混凝土的劲度模量是一个重要的材料特性,也是非常敏感的一个性能指标.影响沥青混凝土劲度模量的因素很多,如沥青用量、混合料的压实度和空隙率、以及反映车辆行驶速度的加载时间和所处的环境温度条件等.浇注式沥青混凝土除了材料组成不同于普通沥青混凝土外,其劲度模量在常温下也远远高于普通沥青混凝土.弯曲应变疲劳试验又是以劲度模量的衰减比例作为疲劳破坏标准,所以选择浇注式沥青混凝土劲度模量作为疲劳损伤参量能较好地表征其疲劳特性.

1.2 疲劳损伤因子的计算

引起材料损伤的因素很多.在一定环境条件或荷载作用下,都会引起材料的损伤即材料性能的劣化.疲劳破坏是材料在交变荷载作用下损伤逐渐累积并最终导致失效的力学行为.

设 A' 为试件实际承载面积,即扣除了由于损伤而不能承载的部分面积后得到的面积; A 为名义面积(初始面积),即无损伤状态下的面积; ψ 为 A' 和 A 之比.设定 D 为损伤因子,其中, $D=0$ 对应于无损状态; $D=1$ 表征材料完全断裂; $0 < D < 1$ 对应于不同程度的损伤状态.损伤因子可定义为^[3]:

$$D = 1 - \psi = 1 - \frac{A'}{A} \quad (1)$$

由于损伤导致有效面积减小,有效应变(ϵ^*)则增大.定义有效应变为:

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon}{1-D} \quad (2)$$

对于在应变(ϵ)控制模式下的弯曲疲劳试验而言,每次加载时,试件的变形保持不变,而劲度模量随加载次数的增加而不断减小.当试件承受 N 次加载后,试件承受的应力(σ_N)减小,此时试件的劲度模量(S_N)由下式计算:

$$S_N = \frac{\sigma_N}{\epsilon} \quad (3)$$

故

$$\sigma_N = S_N \epsilon \quad (4)$$

根据应力等效假设,损伤材料的本构关系可以采用无损时的形式^[4].据此整理得到:

$$D = 1 - \frac{S_N}{S_0} \quad (5)$$

$$\Delta D = 1 - \frac{S_{N+1}}{S_N} \quad (6)$$

其中: S_0 为初始劲度模量; S_N 和 S_{N+1} 分别为单位次数荷载作用前后小梁试件的劲度模量; ΔD 为单位次数荷载作用下材料的损伤因子增量^[5].

2 浇注式沥青混凝土疲劳损伤过程分析

2.1 浇注式沥青混凝土疲劳试验条件

四点小梁弯曲疲劳试验采用应变或应力控制模式.试验温度为 15°C ;加载波形为 Haversine(偏正弦波);加载频率为 10 Hz ;应变水平为 800×10^{-6} .试件尺寸为: $385\text{ mm} \times 65\text{ mm} \times 50\text{ mm}$;

2.2 胶结料和集料级配的选择

胶结料使用复合改性沥青,其性能指标见表 1.集料级配为 GA10. GA10 内部空隙率不足 1% (体积分),且分布相对均匀,所得试验结果比较稳定,这有利于试验结果的评价.

表 1 改性沥青性能指标

Table 1 Performance index of modified asphalt

Performance index	Test value
Penetration(25°C)/0.1 mm	31.8
Softening point/ $^\circ\text{C}$	86
Ductility(10°C)/cm	35.3
Dynamic viscosity(135°C)/(mPa·s)	4 227.3

2.3 浇注式沥青混凝土疲劳损伤过程分析

在疲劳过程中,每一次荷载作用都对材料造成损伤,沥青混凝土疲劳过程就是损伤累积过程,图 1 和图 2 分别为在应变和应力控制模式下,浇注式沥青混凝土劲度模量损伤累积过程图.

由图 1 和图 2 可知,在不同加载控制模式和不同温度条件下,浇注式沥青混凝土劲度模量损伤累积过程都具有相同的变化趋势,即:随着加载作用次数的增加,浇注式沥青混凝土的损伤累积不断增加.由于试件结构内部的微观缺陷等原因,损伤初期劲度模量急剧减小,损伤累积增加较快.随后劲度模量衰减进入相对稳定状态,从而使得试件内部损伤的进一步发展受到抑制^[6-7],损伤累积出现一个稳定的缓慢的阶段.随着加载作用次数的增加,劲度模量

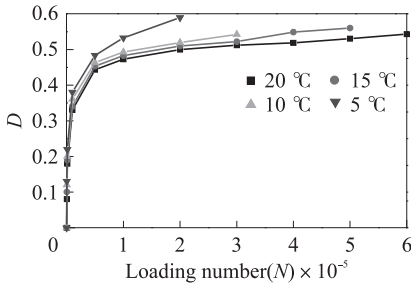


图1 应变控制下浇注式沥青混凝土劲度模量损伤累积
Fig.1 Damage accumulation of stiffness modulus of GA under strain control

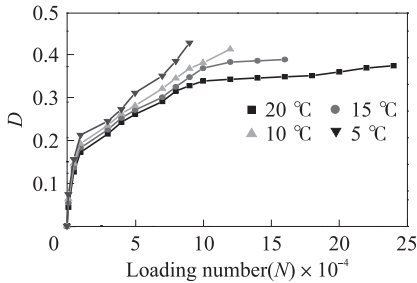


图2 应力控制下浇注式沥青混凝土劲度模量损伤累积
Fig.2 Damage accumulation of stiffness modulus of GA under stress control

又迅速降低,试件完全失效。

3 浇注式沥青混凝土疲劳损伤模型

3.1 疲劳破坏新标准

如何定义沥青混凝土疲劳破坏是当前疲劳研究的主要难点.目前通常将混凝土劲度模量下降至初始劲度模量的50%认作为混凝土出现疲劳裂缝的时间点.这种定义一定的问题,因为初始劲度模量在加载初期波动范围很大,而且确定初始劲度模量目前也没有统一的方法和标准.一些研究者将加载第100次时的劲度模量作为初始劲度模量值,也有把加载第50次时的劲度模量作为初始劲度模量值.因此,目前关于混凝土疲劳破坏时间的定义是凭借经验确定的。

浇注式沥青混凝土具有沥青含量、矿粉含量和拌和温度高的特点,特殊的沥青胶结料和较高的拌和温度使其具有较高的劲度模量.在标准疲劳试验条件(试验温度15℃,加载频率10 Hz)和较高的应变水平($600 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$)下,浇注式沥青混凝土的劲度模量可以达到7000~14000 MPa.按照传统疲劳破坏定义方式,其破坏时劲度模量尚有3500~7000 MPa.在常温20~25℃下,浇注式沥青混凝土的劲度模量也同样高于普通沥青混凝土.因此,把疲劳裂缝出现时间假设为劲度模量下降至初始劲度模

量的50%是不能准确表征浇注式沥青混凝土的疲劳性能,可能明显低估了其疲劳寿命,而且也不能有效反映其结构特性。

图3为不同温度下浇注式沥青混凝土损伤因子增量 ΔD 与 N/N_f (加载次数与疲劳寿命之比)的关系。

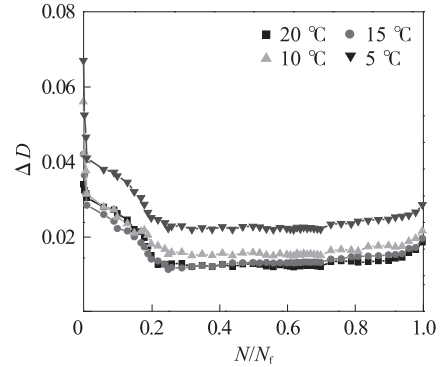


图3 不同温度下损伤因子增量与 N/N_f 的关系
Fig.3 Relationship between damage increment(ΔD) and N/N_f at different temperatures

由图3可见,不同温度下浇注式沥青混凝土损伤因子增量随 N/N_f 变化均呈现出3个阶段.在第3阶段,损伤因子增量急剧增加,此时试件发生破坏,出现疲劳裂缝,因此将 $\Delta D-N/N_f$ 曲线上损伤因子增量开始发生急剧突变定义为新的疲劳破坏标准,此时的加载次数为试件的疲劳寿命.疲劳破坏时的损伤因子称为临界损伤因子 D_p ,见图4所示。

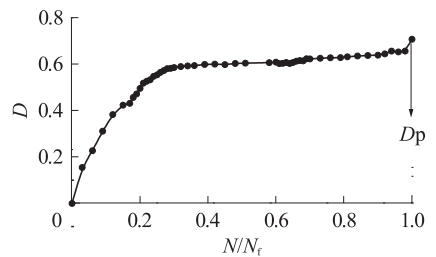


图4 临界损伤因子 D_p
Fig.4 Critical damage factor D_p

3.2 浇注式沥青混凝土疲劳损伤演化规律

在 800×10^{-6} 应变水平下,分别进行了5,10,15,20℃的浇注式沥青混凝土四点小梁弯曲疲劳试验;由于在较低温度下浇注式沥青混凝土的劲度模量非常大, 1000×10^{-6} 应变水平下所需的应力超出了四点弯曲设备的极限承载力,所以在 1000×10^{-6} 应变水平下只进行了15℃和20℃这2个温度水平试验(15,20℃分别是我国和美国有关疲劳试验规范的标准当量温度).试验结果分别见表2及图5,6。

表 2 浇注式沥青混凝土的疲劳寿命及对应的临界损伤因子

Table 2 Fatigue life and critical damage factor of GA

Temperature/°C	Strain level×10 ⁶	N _f /times	D _p
5	800	136 420	0.55
10	800	372 460	0.59
15	800	751 980	0.62
20	800	>1 000 000	0.75
15	1000	317 490	0.63
20	1000	446 910	0.68

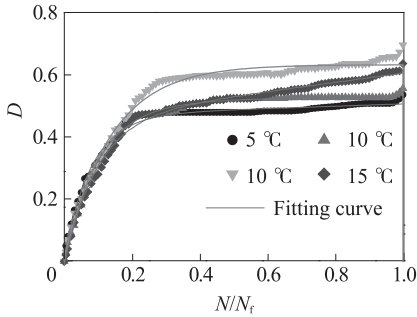


图 5 在 800×10⁻⁶应变水平下,损伤因子 D 随 N/N_f 变化曲线

Fig. 5 Change of damage factor(D) with N/N_f at 800×10⁻⁶ strain level

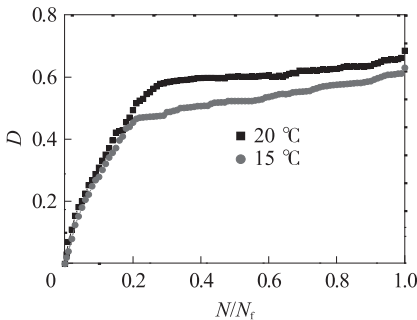


图 6 在 1 000×10⁻⁶应变水平下,损伤因子 D 随 N/N_f 变化曲线

Fig. 6 Change of damage factor(D) with N/N_f at 1 000×10⁻⁶ strain level

由表 2 可知,在应变水平为 800×10⁻⁶,温度为 5~20 °C 条件下,浇注式沥青混凝土的临界损伤因子大约在 0.55~0.75 之间.温度越低,其临界损伤因子越小,而且疲劳寿命相对较短.随着温度的升高,浇注式沥青混凝土的临界损伤因子逐渐增大,且呈现出了优异的疲劳性能,加载次数达到了百万次.在应变水平为 1 000×10⁻⁶时,浇注式沥青混凝土也呈现出温度越高,临界损伤因子越大、疲劳寿命越长的特征.

由图 5 和图 6 可知,浇注式沥青混凝土的疲劳损伤分为 3 个阶段:(1)损伤初始较快发展阶段,该阶段约占疲劳过程的 10%~20%.这是由于材料内

部存在微裂缝、杂质、孔隙和薄弱界面等缺陷,荷载作用在这些缺陷上产生应力集中,每次荷载作用下产生的损伤较大,损伤发展较快.(2)损伤稳定发展阶段,该阶段占疲劳过程的 70%~80%左右.在这一阶段,由于沥青混凝土的自愈特性,劲度模量持续、稳定地变化,导致疲劳损伤变化速率基本为定值,单位次数荷载作用下浇注式沥青混凝土的损伤增量围绕一个稳定值上下波动.(3)损伤破坏阶段,该阶段约占疲劳过程的 5%~10%.在此阶段,单位次数荷载作用下的混凝土损伤增量急剧增加,此时可认为浇注式沥青混凝土发生了疲劳破坏.

由图 5 和图 6 可知,浇注式沥青混凝土在 800×10⁻⁶和 1 000×10⁻⁶应变水平下的损伤因子(D)随 N/N_f 的变化均呈幂函数规律,故只对 800×10⁻⁶应变水平下 4 个温度水平的试验结果进行了拟合.

笔者采用 origin 软件特有的模型 ExpAssoc 进行拟合,ExpAssoc 函数为:

$$y = y_0 + A_1(1 - e^{-x/t_1}) + A_2(1 - e^{-x/t_2}) \quad (7)$$

式中:y₀, A₁, t₁, A₂, t₂ 均为拟合参数,与温度、加载频率和应变水平大小有关.由于未考虑初始损伤,所以 y₀=0.因变量 y 即为 D;自变量 x 即为 N/N_f.采用式(7)对损伤变量 D 随 N/N_f 变化曲线进行拟合,结果见图 5 和表 3.

表 3 浇注式沥青混凝土损伤因子拟合参数

Table 3 Fitting parameters of damage factor for GA

Temperature/°C	A ₁	t ₁	A ₂	t ₂	R ²
5	0.457	0.081	6.906	1.879	0.978
10	0.513	0.101	3.539	1.612	0.992
15	0.311	0.138	0.311	0.138	0.970
20	1.727	1.176	0.471	0.097	0.988

由表 3 可以看出,试验结果拟合的相关系数达到了 0.97 以上,拟合度非常好.因此,耦合了温度因素的浇注式沥青混凝土疲劳损伤模型为:

$$D = A_1 \left(1 - e^{-\frac{N/N_f}{t_1}}\right) + A_2 \left(1 - e^{-\frac{N/N_f}{t_2}}\right) \quad (8)$$

4 结论

通过应力等效假定推导出劲度模量损伤因子和损伤因子增量计算公式,定义了损伤因子增量稳定阶段与加速阶段的转折点为浇注式沥青混凝土疲劳寿命判断的时间点,定义了浇注式沥青混凝土疲劳破坏时的损伤因子为其临界损伤因子,并计算得到 5~20 °C 时其大约为 0.55~0.75.低温下,浇注式沥青混凝土临界损伤因子较小,疲劳寿命相对较短;随着温度的增大,浇注式沥青混凝土临界损伤因子也

逐渐增大,而且呈现出优异的疲劳性能,加载次数达到了百万次.最后对浇注式沥青混凝土疲劳损伤演化过程进行了分析,并根据演化规律选择了合适的模型对损伤因子与 N/N_f 关系进行了拟合,建立耦合了温度因素的浇注式沥青混凝土疲劳损伤模型.

参考文献:

- [1] 吴文军,张华,钱觉时.浇注式沥青混凝土应用现状综述[J].公路交通技术,2009(3):60-63.
WU Wen-jun,ZHANG Hua,QIAN Jue-shi. Review on the research and application status of gussasphalt concrete[J]. Technology of Highway and Transport, 2009(3):60-63. (in Chinese).
- [2] YANG Jun. Study on low temperature performance of gussasphalt on steel decks with hard bitumen[J]. Journal of Southeast University,2003,19(2):54-57. (in Chinese).
- [3] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社,2002:56-63.
LI Zhao-xia. Damage mechanics and its application[M]. Beijing. Science Press,2002:56-63.
- [4] 朱洪洲,黄晓明.一种新的沥青混合料疲劳性能评价方法[J].公路交通科技,2005(2):4-6.
ZHU Hong-zhou, HUANG Xiao-ming. Fatigue model of asphalt mixtures based on damage theory[J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2005(2):4-6 (in Chinese). 中英文不一致
- [5] 栾利强. 考虑损伤与愈合的沥青混凝土疲劳性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
LUAN Li-qiang Research on fatigue performance of asphalt mixture coupling with damage and healing[D]. Changsha:Changsha University of Science and Technology,2009. (in Chinese) 中英文不一致
- [6] CASTRO M, SANCHEZ J A. Estimation of asphalt concrete fatigue curves - A damage theory approach[J]. Construction and Building Materials,2007(22):1232-1238.
- [7] SOUSA J B, PAIS J C, PEREIRA P, et al. Mode of loading on flexural fatigue laboratory properties of conventional and asphalt rubbermixes: A model validation (Part 1): Performance testing and evaluation of bituminous materials[M]. Bagneux: RILEM Publications,2003:364-371.