

循环荷载作用下沥青混合料的黏弹塑性损伤本构模型

张俊, 李志伟

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为较好描述损伤状态下沥青混合料的黏弹塑性应力-应变关系、明确动态循环荷载对其损伤本构关系的影响,利用经典黏弹塑性流变理论,在 Burgers 黏弹性模型上串联一个黏塑性元件,并根据损伤力学应变等效原理,建立了一个能体现动态循环荷载作用特点及能考虑加载频率影响的沥青混合料黏弹塑性损伤本构模型. 同时进行间接拉伸疲劳试验,研究加载频率、环境温度、应力水平、沥青用量及沥青种类对混合料应力-应变关系的影响,并标定模型参数、验证模型的有效性. 结果表明:所建模型不仅能较好描述沥青混合料在动态循环荷载作用下的损伤本构关系,还能体现加载频率、环境温度及荷载水平等因素对应力-应变关系的影响;模型参数意义明确、规律性强,值得进一步研究和推广.

关 键 词: 道路工程;损伤本构模型;间接拉伸疲劳试验;疲劳损伤;损伤演化模型;循环荷载

中图分类号: U 411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)10-1496-08

Viscoelastic-Plastic Damage Constitutive Model of Asphalt Mixture Under Cyclic Loading

ZHANG Jun, LI Zhi-wei

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Jun, E-mail: zhangjun11242@sohu.com)

Abstract: In order to better describe the viscoelastic-plastic stress-strain relationship of asphalt mixture during damage process, and to clarify the effect of dynamic cyclic loading on the damage constitutive relation of the mixture, a viscoplastic element was connected in series to the Burgers viscoelastic model based on the classical viscoelastic plastic rheological theory. According to the strain equivalent principle of damage mechanics, a viscoelastic-plastic damage constitutive model of the asphalt mixture was established, which can reflect the dynamic cyclic loading characteristics and consider the influence of loading frequency. Then the indirect tensile fatigue tests were carried out to study the effects of loading frequency, ambient temperature, stress level, asphalt dosage and asphalt type on the stress-strain relationship of the mixture, and to calibrate the model parameters in order to verify the validity of the model. The results show that the model can not only better describe the damage constitutive relationship of asphalt mixture under dynamic cyclic loading, but also can reflect the influence of loading frequency, ambient temperature and load level on the stress-strain relationship of the mixture. Because the meaning of the parameters in the model is clear and regular, it deserves further research and promotion.

Key words: road engineering; damage constitutive model; indirect tensile fatigue test; fatigue damage; damage evolution model; cyclic loading

沥青路面疲劳破坏的本质是混合料在车辆荷载和环境因素重复作用下,最终发生破坏的一种

疲劳损伤现象,所以采用疲劳损伤理论研究该问题具有其内在优势.

疲劳损伤理论主要包括:定义合适的损伤变量;建立受损材料的损伤演化模型和损伤本构模型;求解受损材料的应力、应变和损伤场.这些内容中,以建立受损材料的损伤本构模型和损伤演化模型最为关键,历来关于疲劳损伤理论的研究皆以此为主,沥青路面亦不例外,建立一个合适的沥青混合料损伤本构模型,一直都是该领域研究的一个热点^[1-6].

纵观沥青混合料损伤本构模型研究现状,当前研究多以静态荷载作用下混合料的损伤本构关系为主,研究动态循环荷载作用下损伤本构关系的工作并不多^[7-12];另外,沥青混合料是一种典型的黏弹塑性材料,温度较低、荷载较小、加载频率较大时可用黏弹性甚至弹性来表示,而温度较高、荷载较大、加载频率较小时,则表现出明显的黏塑性特点,而就目前现状来看,研究多以黏弹性模型为主,对于黏弹塑性损伤本构的研究还处于发展阶段^[13-18].

鉴于此,本文根据经典黏弹塑性流变理论和损伤力学应变等效原理,建立了一个能够反映动态循环荷载作用特点的沥青混合料黏弹塑性损伤本构模型,并通过不同条件下的室内疲劳试验,对模型进行了验证,以期为沥青混合料损伤本构关系研究提供借鉴.

1 损伤本构理论基本简介

1.1 疲劳损伤力学

损伤力学是固体力学的一个分支,其宗旨是研究材料在受力过程中内部产生的损伤及其损伤的发展对材料力学性能的影响.损伤力学研究对象包括弹塑性损伤、疲劳损伤、蠕变损伤,以及腐蚀、辐射损伤.其中,疲劳损伤专门研究材料在循环荷载作用下的应力、应变及损伤演变规律,相应专门研究疲劳损伤的力学常称之为疲劳损伤力学.

1.2 损伤演化模型

疲劳损伤演化模型用来描述损伤随加载次数增加而演化累积的规律,是一个损伤变量和加载次数、应力、应变及环境影响变量之间的数学关系.疲劳损伤演化模型反映一次循环加载能给工程结构造成多大损伤,以及多次循环加载造成的损伤如何演化累积,是疲劳损伤力学的核心内容.

疲劳损伤演化模型为

$$\frac{dD}{dN}=f(s \text{ 或 } e \text{ 或 } W,N,D,u,\cdots) . \quad (1)$$

式中: D 为损伤变量; N 为循环加载次数; σ, ε 为应力、应变; W 为耗散能; u 为反映环境影响因素的变量.

当边界条件给定后,对以上微分形式的损伤演化模型进行积分,即可得损伤变量的表达式:

$$D=f_1(\sigma \text{ 或 } \varepsilon \text{ 或 } W,N,v,\cdots) . \quad (2)$$

1.3 疲劳损伤本构模型

疲劳损伤力学的另一个核心是建立受损材料的损伤本构模型.该模型一般利用损伤力学应变等效原理来建立,即受损材料的本构关系可用无损状态下的本构关系来代替,并保持受损状态下的本构关系和无损状态下的本构关系形式一致,只需将其中的 Cauchy 应力替换为有效应力即可.例如,对于简单一维情况,其损伤本构模型可表示为

$$\varepsilon_D=\frac{\tilde{\sigma}}{E}=\frac{\sigma}{E(1-D)}=\frac{\varepsilon}{1-D} . \quad (3)$$

式中: ε_D 为考虑损伤的应变; $\tilde{\sigma}$ 为有效应力; E 为初始弹性模量; σ 为 Cauchy 应力; \bar{E} 为有效弹性模量; ε 为无损时的应变.

2 黏弹塑性损伤本构模型

2.1 黏弹塑性本构模型的建立

2.1.1 黏弹塑性流变模型

在 Burgers 模型基础上,串联一个黏塑性元件,构建一个黏弹塑性流变模型,用于描述沥青混合料的黏弹塑性本构关系.黏塑性元件由一个非线性黏壶和一个塑性滑块并联组成,具体如图 1 所示.

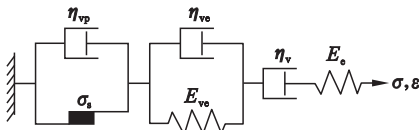


图 1 黏弹塑性流变模型
Fig. 1 Viscoelastic-plastic rheological model

2.1.2 车辆循环荷载的简化

车辆循环荷载简化为周期性变化的三角函数:

$$\sigma(t)=\frac{\sigma_0}{2}(1-\cos 2 \pi f t) . \quad (4)$$

式中: σ_0 为循环荷载峰值; f 为加载频率.

2.1.3 循环荷载作用下黏弹塑性模型的应变响应

循环荷载作用下沥青混合料的黏弹塑性应变响应可分为黏弹性和黏塑性两部分^[14-16],并认为这两种应变由 Burgers 模型和黏塑性体分别体现:

$$\varepsilon = \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} \tag{5}$$

式中: ε_{ve} 为黏弹性应变; ε_{vp} 为黏塑性应变.

1) 黏弹性应变. Burgers 模型为线性黏弹性

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ve}(t) &= 0 + \pi f \sigma_0 \int_0^t \left[\frac{1}{E_e} + \frac{t - \tau}{\eta_v} + \frac{1}{E_{ve}} \left(1 - e^{-\frac{E_{ve}}{\eta_{ve}}(t-\tau)} \right) \right] \sin(2\pi f \tau) d\tau = \\ &\pi f \sigma_0 \int_0^t \left(\frac{1}{E_e} + \frac{t}{\eta_v} + \frac{1}{E_{ve}} \right) \sin(2\pi f \tau) d\tau - \pi f \sigma_0 \int_0^t \left(\frac{\tau}{\eta_v} + \frac{e^{-\frac{E_{ve}}{\eta_{ve}}(t-\tau)}}{E_{ve}} \right) \sin(2\pi f \tau) d\tau = \\ &-\frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{1}{E_e} + \frac{t}{\eta_v} + \frac{1}{E_{ve}} \right) \cos(2\pi f \tau) \Big|_0^t - \pi f \sigma_0 \int_0^t \frac{\tau}{\eta_v} \sin(2\pi f \tau) d\tau - \pi f \sigma_0 \int_0^t \frac{e^{-\frac{E_{ve}}{\eta_{ve}}(t-\tau)}}{E_{ve}} \sin(2\pi f \tau) d\tau = \\ &\frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{1}{E_e} + \frac{t}{\eta_v} + \frac{1}{E_{ve}} \right) (1 - \cos 2\pi f t) - \pi f \sigma_0 \left(\frac{\sin 2\pi f t}{4\pi^2 f^2 \eta_v} - \frac{t \cos 2\pi f t}{2\pi f \eta_v} \right) - \\ &\pi f \sigma_0 \frac{e^{\frac{E_{ve}}{\eta_{ve}}(-t)}}{E_{ve}} \frac{\frac{E_{ve}}{4\pi^2 f^2 \eta_{ve}} \left(e^{\frac{E_{ve}}{\eta_{ve}} \tau} \sin(2\pi f \tau) \right) \Big|_0^t - \frac{1}{2\pi f} \left(e^{\frac{E_{ve}}{\eta_{ve}} \tau} \cos(2\pi f \tau) \right) \Big|_0^t}{1 + \frac{E_{ve}^2}{4\pi^2 f^2 \eta_{ve}^2}}. \end{aligned} \tag{7}$$

为了将应变表示成加载次数的函数,将 $t = NT$ 代入式(7),可得加载 N 个周期后总的黏弹性应变:

$$\varepsilon_{ve} = \frac{NT\sigma_0}{2\eta_v} + \frac{\frac{\sigma_0}{2E_{ve}}(1 - e^{-\frac{E_{ve}}{\eta_{ve}}NT})}{1 + \frac{E_{ve}^2}{4\pi^2 f^2 \eta_{ve}^2}} \tag{8}$$

式中: E_e, E_{ve} 为弹性模量; η_v, η_{ve} 为黏滞系数; T 为循环荷载周期; N 为循环加载次数.

2) 黏塑性应变. ①黏塑性描述:模型的黏塑性变形由非线性黏滞阻尼器来描述,阻尼器所受应力与其蠕变加速度成正比^[17],例如一维情况,其应力 σ_{vp} 与应变 ε_{vp} 的关系可表示为

$$\langle \sigma_{vp} - \sigma_s \rangle = \eta_{vp} \ddot{\varepsilon}_{vp} \tag{9}$$

式中: η_{vp} 为黏塑性元件中黏壶的黏滞系数; σ_s 为极限应力; $\ddot{\varepsilon}_{vp}$ 为黏塑性应变的二阶导数; $\langle \rangle$ 为开关函数,表达式为

$$\langle \sigma_{vp} - \sigma_s \rangle = \begin{cases} 0, & \sigma_{vp} \leq \sigma_s, \\ \sigma_{vp} - \sigma_s, & \sigma_{vp} > \sigma_s. \end{cases} \tag{10}$$

常应力 $\sigma = \sigma_0$ 作用下,黏塑性元件的蠕变方程为

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\langle \sigma_0 - \sigma_s \rangle}{2\eta_{vp}} t^2 - At \tag{11}$$

式中: t 为时间; A 为常数.

②黏塑性应变:循环荷载 $\sigma(t) > \sigma_s$ 时,黏塑

模型,其在循环荷载作用下的黏弹性应变可由 Boltzmann 叠加原理得出.

积分型本构模型的应变表达式为

$$\varepsilon(t) = J(t) \sigma(0) + \int_0^t J(t - \tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \tag{6}$$

可得 Burgers 模型在循环荷载作用下任意时刻的黏弹性应变为

性元件会产生应变; $\sigma(t) \leq \sigma_s$ 时,则不产生应变.以第一周期分析为例(见图 2),假定在 $t_1 < t < t_2$ 时间段内,塑性元件发挥作用,模型产生黏塑性应变,当 $\sigma(t) = \sigma_s$ 时,可分别求出 t_1, t_2 的值.采用积分思想,将区间 $[t_1, t_2]$ 分割成 n 个小区间,可认为每一个小区间内发生的均为蠕变应变.把每个小区间内的蠕变应变求和,即为第一周期内发生的黏塑性应变:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_{vp,i} \Delta t_i = \\ &\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\langle \sigma(t) - \sigma_s \rangle}{2\eta_{vp}} t^2 - At \right) dt = \\ &\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\frac{\sigma_0}{2}(1 - \cos 2\pi f t) - \sigma_s}{2\eta_{vp}} t^2 - At \right) dt = \\ &\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\sigma_0}{4\eta_{vp}} - \frac{\sigma_s}{2\eta_{vp}} \right) t^2 dt - \int_{t_1}^{t_2} A t dt = \\ &\int_{t_1}^{t_2} \frac{\sigma_0}{4\eta_{vp}} t^2 \cos(2\pi f t) dt = \\ &\left(\frac{\sigma_0 - 2\sigma_s t^3}{12\eta_{vp}} \right) \Big|_{t_1}^{t_2} - \left(\frac{A}{2} t^2 \right) \Big|_{t_1}^{t_2} - \\ &\frac{\sigma_0}{8\pi f \eta_{vp}} \left(t^2 \sin(2\pi f t) \right) \Big|_{t_1}^{t_2} - \\ &\frac{\sigma_0}{8\pi^2 f^2 \eta_{vp}} \left(t \cos(2\pi f t) \right) \Big|_{t_1}^{t_2} + \end{aligned}$$

$$\frac{\sigma_0}{16\pi^3 f^3 \eta_{vp}}(\sin(2\pi ft)) \Big|_{t_1}^{t_2} . \tag{12}$$

个加载周期后,把每个周期的黏塑性应变叠加即可得总的黏塑性应变:

同样将应变表示为加载次数的函数,经过 N

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vp} &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \cdots + \varepsilon_N = \\ &\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{<\sigma(t) - \sigma_s>}{2\eta_{vp}} t^2 - At \right) dt + \\ &\int_{t_1+T}^{t_2+T} \left(\frac{<\sigma(t) - \sigma_s>}{2\eta_{vp}} t^2 - At \right) dt + \cdots + \\ &\int_{t_1+(N-1)T}^{t_2+(N-1)T} \left(\frac{<\sigma(t) - \sigma_s>}{2\eta_{vp}} t^2 - At \right) dt = \\ &\frac{(\sigma_0 - 2\sigma_s)N}{12\eta_{vp}} \left[t_2^3 - t_1^3 + \frac{3T}{2}(N-1)(t_2^2 - t_1^2) + \right. \\ &\left. \frac{AN}{2}[t_2^2 - t_1^2 + T(N-1)(t_2 - t_1)] - \right. \\ &\frac{\sigma_0 N}{8\pi f \eta_{vp}} [(t_2^2 + T(N-1)t_2) \sin(2\pi f t_2) - \\ &(t_1^2 + T(N-1)t_1) \sin(2\pi f t_1)] - \\ &\frac{\sigma_0 N}{8\pi^2 f^2 \eta_{vp}} \left[\left(t_2 + \frac{T(N-1)}{2} \right) \cos(2\pi f t_2) - \right. \\ &\left. \left(t_1 + \frac{T(N-1)}{2} \right) \cos(2\pi f t_1) \right] + \\ &\left. \frac{\sigma_0 N}{16\pi^3 f^3 \eta_{vp}} [\sin(2\pi f t_2) - \sin(2\pi f t_1)] \right] . \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

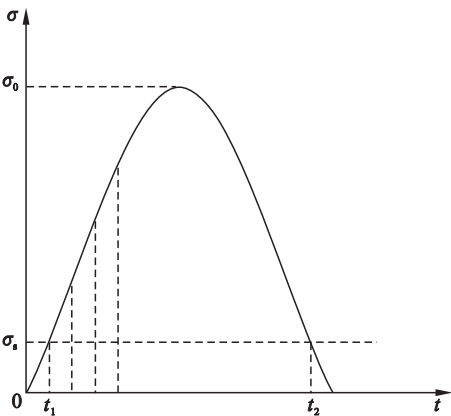


图 2 第一周期的分割方法
Fig. 2 Segmentation method for the first cycle

2. 2 黏弹塑性损伤本构模型的建立

2. 2. 1 疲劳损伤演化模型

损伤演化模型采用修正的 Chaboche 模型^[18],Chaboche 模型是一个经典的损伤演化模型,但该模型不能反映加载频率对损伤演化的影响.而大量实践表明,加载频率对沥青混合料的损伤演化特性有重要影响,因此,本文在 Chaboche 模型基础上,引入一个能反映加载频率影响的变

量因子,构建出一个可以体现加载频率的损伤演化模型:

$$\frac{dD}{dN} = f^\alpha \left(\frac{\sigma_a}{b} \right)^\beta (1 - D)^{-(\beta + \gamma)} . \tag{14}$$

对式(14)进行积分,并根据初始条件($N = 0, D = 0$)和破坏条件($N = N_f, D = 1$),可得损伤变量 D 和疲劳寿命的表达式:

$$D(N) = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{\beta + \gamma + 1}} , \tag{15}$$

$$N_f = \frac{1}{\beta + \gamma + 1} \left(\frac{\sigma_a}{b} \right)^{-\beta} f^{-\alpha} . \tag{16}$$

式中: N 为循环加载次数; σ_a 为应力幅值; f 为加载频率; α, β, γ 和 b 均为材料参数,且 b 与平均应力有关.

2. 2. 2 损伤本构模型的建立

建立了沥青混合料的本构模型和损伤演化模型后,即可根据损伤力学应变等效原理建立其损伤本构模型,即把式(8)和式(13)相加,并结合式(15),得出沥青混合料在循环荷载作用下的疲劳损伤本构模型:

$$\varepsilon_D(N) = \frac{1}{\left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{1+\beta+\gamma}}} \left[\frac{NT\sigma_0}{2\eta_v} + \frac{\frac{\sigma_0}{2E_{ve}}(1 - e^{-\frac{E_{ve}}{\eta_v}NT})}{1 + \frac{E_{ve}^2}{4\pi^2 f^2 \eta_{ve}^2}} \right], \sigma(t) \leq \sigma_s;$$
$$\varepsilon_D(N) = \frac{1}{\left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{1+\beta+\gamma}}} \left\{ \frac{NT\sigma_0}{2\eta_v} + \frac{\frac{\sigma_0}{2E_{ve}}(1 - e^{-\frac{E_{ve}}{\eta_v}NT})}{1 + \frac{E_{ve}^2}{4\pi^2 f^2 \eta_{ve}^2}} + \right.$$
$$\frac{(\sigma_0 - 2\sigma_s)N}{12\eta_{vp}} \left[t_2^3 - t_1^3 + \frac{3T}{2}(N-1)(t_2^2 - t_1^2) + \frac{T^2(N-1)(2N-1)}{2}(t_2 - t_1) \right] -$$
$$\frac{AN}{2} [t_2^2 - t_1^2 + T(N-1)(t_2 - t_1)] -$$
$$\frac{\sigma_0 N}{8\pi f \eta_{vp}} [(t_2^2 + T(N-1)t_2) \sin(2\pi f t_2) - (t_1^2 + T(N-1)t_1) \sin(2\pi f t_1)] -$$
$$\frac{\sigma_0 N}{8\pi^2 f^2 \eta_{vp}} \left[\left(t_2 + \frac{T(N-1)}{2} \right) \cos(2\pi f t_2) - \left(t_1 + \frac{T(N-1)}{2} \right) \cos(2\pi f t_1) \right] +$$
$$\left. \frac{\sigma_0 N}{16\pi^3 f^3 \eta_{vp}} [\sin(2\pi f t_2) - \sin(2\pi f t_1)] \right\}, \sigma(t) > \sigma_s.$$

(17)

示. 石料为辽阳小屯石灰岩,级配如表 2 所示. 采用标准马歇尔试件,双面各击实 50 次.

3 模型验证

3.1 试验概况

3.1.1 试验材料

试验所用混合料为 AC-13 型密级配沥青混合料,分别采用两种胶结料,即齐鲁石化 90#沥青,和改性剂掺量为 3% 的 SBS 改性沥青,沥青用量均为 4.77%,基质沥青的基本参数如表 1 所

表 1 基质沥青基本性能指标

Table 1 Performance parameters for base asphalt

指标	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm	82
软化点/℃	46.1
延度(15℃,5 cm/min)/cm	>100

表 2 AC-13 型混合料的级配

Table 2 Aggregate composition of AC-13 mixture

筛孔直径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
目标级配/%	100	9.5	76.5	53	37	26.5	19	13.5	10	6
合成级配/%	100	93.3	76.7	52.7	32.2	24.2	17.8	11.6	9.9	7.9

3.1.2 试验方法

室内试验采用间接拉伸疲劳试验,加载模式采用控制应力方式,加载波形为连续三角函数,见图 3. 设定最小荷载为最大荷载的 2%,以防试件脱空. 试验机为日本岛津 EHF-UV050k1-020-1A 电液伺服疲劳试验机,见图 4,试验机标配 Epsilon 精密引伸计和高低温环境箱,采用其标配 4830 控制器控制试验和采集数据. 所有试验均在环境箱中进行,试验测试之前先将试件在环境箱中保温 6 h,以确保试件温度符合要求.

3.1.3 试验方案

试验分别在 4 种温度(-15,0,15,30℃),3 种加载频率(5,10,20 Hz),3 种应力比(0.3,0.5,

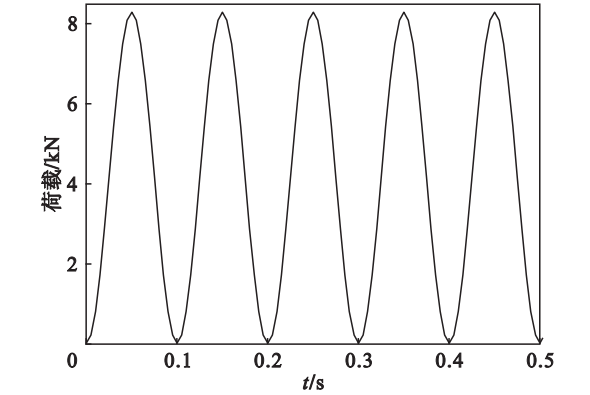


图 3 加载波形示意图(10 Hz)

Fig. 3 Schematic diagram of loading waveform(10 Hz)

0.7) 和 2 种沥青种类(普通基质沥青和 SBS 改性沥青)条件下进行,共 27 个试件,分为 9 组,每组 3 个平行试件.

疲劳试验进行之前,测定了试件在不同温度下的静态劈裂强度,每种工况 4 个平行试件,加载速率 50 mm/min,结果如表 3 所示.

3.2 试验结果与模型计算结果的对比

3.2.1 模型参数

循环荷载 $\sigma(t)$ 小于或等于混合料极限应力 σ_s 时,模型退化为损伤的 Burgers 模型,需要标定的参数有 $\eta_v, E_{ve}, \eta_{ve}, \beta, \gamma$ 及疲劳寿命 N_f ; 而当荷载 $\sigma(t)$ 大于混合料极限应力 σ_s 时,模型为黏弹塑性损伤本构模型,需要标定的参数有 $\eta_v, E_{ve}, \eta_{ve}, \eta_{vp}, \beta, \gamma, A$ 及疲劳寿命 N_f . 这里混合料的极限应力,根据 González 等^[19] 试验结果取 $\sigma_s = 50 \text{ kN/m}^2$. 最后利用 Origin 软件的自定义函数拟合功能拟合得出模型参数,结果见表 4 ~ 表 7. 拟

合参数时,每种工况的 3 个平行试验分别拟合,结果取其平均值.

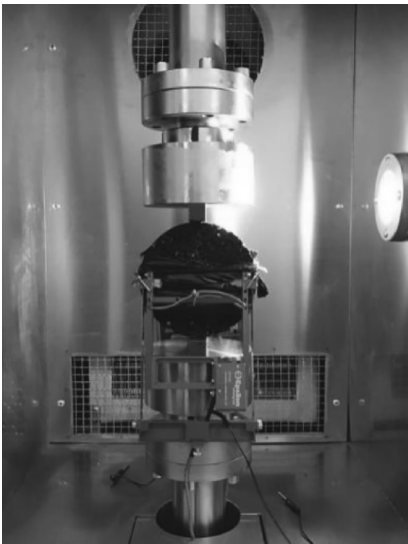


图 4 EHF – UV 型电液伺服疲劳试验系统
Fig. 4 EHF-UV electro-hydraulic servo fatigue test system

表 3 沥青混合料劈裂强度试验结果
Table 3 Splitting strength of asphalt mixture

试验温度/℃	-15	0	15	30
劈裂强度/MPa	3.975 9	2.879 8	1.317 1(舍弃)	0.530 7
	3.278 3(舍弃)	2.882 9	1.596 5	0.557 0
	4.158 7	2.991 7	1.588 2	0.518 7
	3.977 9	2.989 8	1.678 1	0.608 7(舍弃)
劈裂强度平均值/MPa	4.037 5	2.936 0	1.620 9	0.535 5

表 4 不同频率下的模型参数取值
Table 4 Model parameter values under different frequencies

温度/℃	应力比	频率/Hz	N_f	η_v	E_{ve}	η_{ve}	η_{vp}	$\frac{1}{1+\beta+\gamma}$	$A \times 10^6$
15	0.5	5	489.0	49.25	123.4	131.1	40 328.7	0.266 4	295.8
		10	975.9	36.24	33.83	49.44	70 722.5	0.301 2	217.7
		20	2 203.1	74.89	0.210	72.05	91 228.9	0.320 8	186.2

表 5 不同温度下的模型参数取值
Table 5 Model parameter values under different temperatures

频率/Hz	应力比	温度/℃	N_f	η_v	E_{ve}	η_{ve}	η_{vp}	$\frac{1}{1+\beta+\gamma}$	$A \times 10^6$
10	0.5	-15	19 654.4	4 269	1 372	0.000 395	8 138 383 333	0.177 0	0.208 1
		0	8 878.7	756.7	22.50	0.313 9	134 201 833	0.259 7	2.085
		15	975.9	36.24	33.83	49.44	70 722.5	0.301 2	217.7
		30	555.0	3.647	3.421	5.830	2 168.0	0.430 2	824.4

表 6 不同应力比下的模型参数取值
Table 6 Model parameter values under different stress ratios

温度/℃	频率/Hz	应力比	N_f	η_v	E_{ve}	η_{ve}	η_{vp}	$\frac{1}{1+\beta+\gamma}$	$A \times 10^6$
15	10	0.3	5 227.6	53.14	4.790	57.83	1 011 027.0	0.258 3	37.59
		0.5	975.9	36.24	33.83	49.44	70 722.5	0.301 2	217.7
		0.7	276.7	44.44	0.256 7	54.15	6 029.2	0.352 1	1 301.1

表 7 不同沥青种类下的模型参数取值
Table 7 Model parameter values for different asphalt types

沥青质量分数/%	沥青种类	N_f	η_v	E_{vc}	η_{vc}	η_{vp}	$\frac{1}{1+\beta+\gamma}$	$A \times 10^6$
4.77	普通沥青	975.9	36.24	33.83	49.44	70 722.5	0.301 2	217.7
	SBS 改性沥青	2 062.3	154.09	0.980 7	890.94	792 944.6	0.280 8	70.6

3.2.2 对比验证

1) 损伤变量:损伤变量采用间接拉伸状态下每一加载循环动态模量的衰变来定义:

$$D = 1 - \frac{|E_n^*|}{|E_0^*|} \tag{18}$$

式中: $|E_0^*|$ 为初始循环的动态模量; $|E_n^*|$ 为第 n 次循环的动态模量.

15 ℃ 时,采用该定义的损伤,其实测结果和模型计算结果的对比情况如图 5 所示.可以看出,该定义能较好体现沥青混合料在循环荷载作用下损伤的发展演化,而且损伤实测结果和模型预测结果吻合较好,不同加载频率下疲劳寿命和损伤演化速率各自不同,说明本文所用损伤演化模型能较好反映沥青混合料在循环荷载作用下的损伤演化规律,且能体现加载频率对混合料损伤演化规律及疲劳寿命的影响.

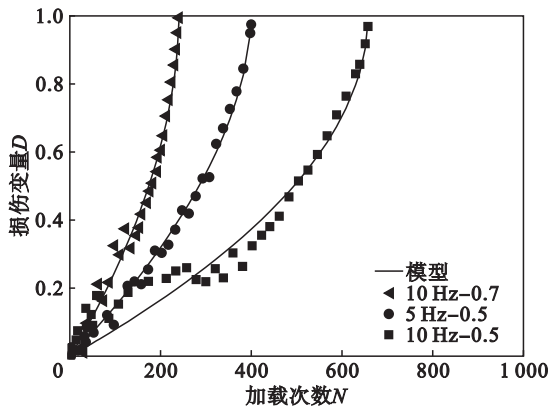


图 5 损伤变量实测结果与模型计算结果的对比
Fig. 5 Comparison of damage variables between experimental results and calculation results

2) 累积应变:将本文所得模型参数代入式(17),计算得出不同工况下沥青混合料累积应变与加载次数的关系曲线,并与试验实测结果进行对比,结果如图 6 ~ 图 9 所示.可知模型计算结果与试验实测结果吻合良好,说明所建模型不仅能较好描述沥青混合料在动态循环荷载作用下的应力-应变特点,而且还能较好体现加载频率、加载次数、环境温度及荷载水平等因素对混合料应力-应变关系的影响,相比现有模型有所进步.

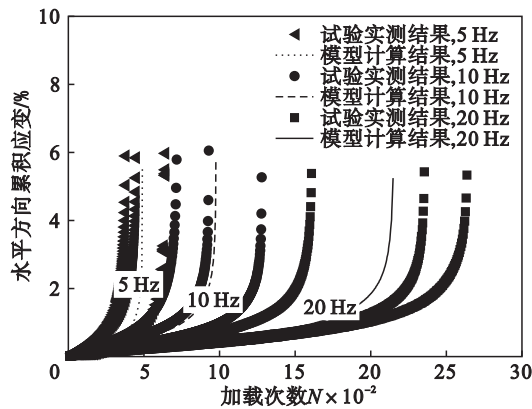


图 6 不同加载频率下模型计算结果与试验结果的对比
Fig. 6 Comparison of accumulated strain in horizontal direction between experimental results and calculation results under different frequencies

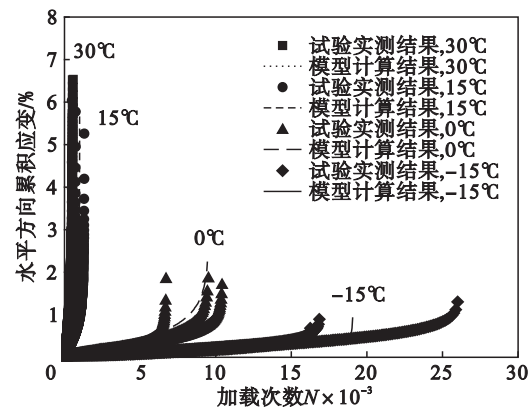


图 7 不同环境温度下模型计算结果与试验结果的对比
Fig. 7 Comparison of accumulated strain in horizontal direction between experimental results and calculation results under different temperatures

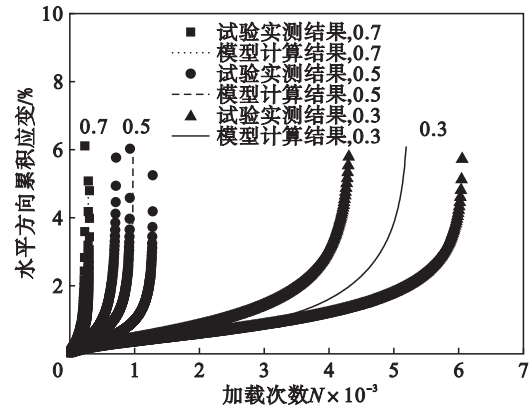


图 8 不同应力比下模型计算结果与试验结果的对比
Fig. 8 Comparison of accumulated strain in horizontal direction between experimental results and calculation results under different stress ratios

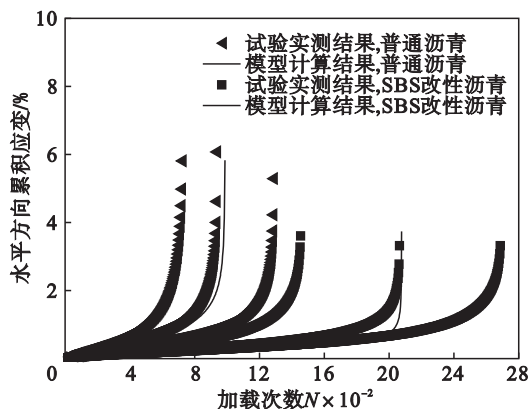


图 9 不同沥青种类下模型计算结果与试验结果的对比
Fig. 9 Comparison of accumulated strain in horizontal direction between experimental results and calculation results for different asphalt types

4 结 论

- 1) 本文所建模型能较好反映动态循环荷载作用下沥青混合料的黏弹塑性损伤本构关系,能体现加载频率、环境温度、荷载水平及加载次数对混合料应力应变关系的影响。
- 2) 沥青混合料损伤演化模型能较好预测混合料在动态循环荷载作用下的损伤演化规律和疲劳寿命,且能较好体现加载频率、荷载水平等因素对混合料损伤演化特性的影响。

参考文献:

[1] Daniel J S, Kim Y R, Brown S. Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model [J]. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 2002, 71: 619 – 650.

[2] Kim Y R, Lee H J, Little D N. Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory [J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1997, 66: 520 – 569.

[3] Mun S, Lee S. Fatigue resistance potential for hot mix asphalt using viscoelastic continuum damage analysis [J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2012, 35(3): 205 – 218.

[4] 葛折圣, 黄晓明. 运用损伤力学理论预测沥青混合料的疲劳性能 [J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(1): 40 – 42, 51. (Ge Zhe-sheng, Huang Xiao-ming. Prediction of asphalt mixtures fatigue properties using damage mechanics [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(1): 40 – 42, 51.)

[5] 郑健龙, 吕松涛. 沥青混合料非线性疲劳损伤模型 [J]. *中国公路学报*, 2009, 22(5): 21 – 28. (Zheng Jian-long, Lyu Song-tao. Nonlinear fatigue damage model for asphalt mixtures [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22(5): 21 – 28.)

[6] Underwood B S. A continuum damage model for asphalt cement and asphalt mastic fatigue [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 82: 387 – 401.

[7] 曾国伟, 杨新华, 白凡, 等. 沥青砂粘弹塑蠕变损伤本构模型实验研究 [J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 249 – 253. (Zeng Guo-wei, Yang Xin-hua, Bai Fan, et al. Experimental research on a visco-elastoplastic creep damage constitutive model of asphalt mastic [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 249 – 253.)

[8] Ye Y, Yang X H, Chen C Y. Experimental researches on visco-elastoplastic constitutive model of asphalt mastic [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(10): 3161 – 3165.

[9] 张久鹏, 黄晓明, 马涛. 沥青混合料损伤蠕变特性及模型研究 [J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(12): 1867 – 1871. (Zhang Jiu-peng, Huang Xiao-ming, Ma Tao. Damage-creep characteristics and model of asphalt mixture [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(12): 1867 – 1871.)

[10] 苏永涛, 张俊. 沥青路面裂缝的疲劳损伤力学数值分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014. (Su Yong-tao, Zhang Jun. Numerical analysis of cracks in asphalt pavement based on fatigue damage mechanics [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.)

[11] 吕松涛, 马健, 郑健龙, 等. 沥青混合料粘弹性疲劳本构模型 [J]. *长沙交通学院学报*, 2006, 22(4): 33 – 37. (Lyu Song-tao, Ma Jian, Zheng Jian-long, et al. A viscoelastic fatigue constitutive model of asphalt mixture [J]. *Journal of Changsha Communications Institute*, 2006, 22(4): 33 – 37.)

[12] Underwood B S, Yun T Y, Kim Y R. Experimental investigations of the viscoelastic and damage behaviors of hot-mix asphalt in compression [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(4): 459 – 466.

[13] 宏宏信, 郑健龙, 张起森. 沥青混合料的黏弹性疲劳损伤模型研究 [J]. *力学与实践*, 2007, 29(2): 50 – 53. (Guan Hong-xin, Zheng Jian-long, Zhang Qi-sen. Viscoelastic fatigue damage model of bituminous mixture [J]. *Mechanics in Engineering*, 2007, 29(2): 50 – 53.)

[14] Uzan J, Sides A, Perl M. Viscoelastoplastic model predicting performance of asphaltic mixtures [J]. *Transportation Research Record*, 1985, 1043: 78 – 89.

[15] Lu Y, Wright P J. Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures [J]. *Computers and Structures*, 1998, 69(2): 139 – 147.

[16] Sun L, Zhu H R, Zhu Y T. Two-stage viscoelastic-viscoplastic damage constitutive model of asphalt mixtures [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(8): 958 – 971.

[17] 叶永, 陈洪凯. 沥青混合料黏塑性变形的不同形式描述 [J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2014, 33(3): 45 – 48. (Ye Yong, Chen Hong-kai. Different modes of viscoplastic deformation behavior for asphalt mixtures [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2014, 33(3): 45 – 48.)

[18] Zhang J, Wang Y Z D, Su Y. Fatigue damage evolution model of asphalt mixture considering influence of loading frequency [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 218: 712 – 720.

[19] González J M, Miquel C J, Oller S, et al. A viscoplastic constitutive model with strain rate variables for asphalt mixtures—numerical simulation [J]. *Computational Materials Science*, 2007, 38(4): 543 – 560.