多孔沥青混合料粘弹塑性损伤模型

易军艳¹, SHEN Shihui², MUHUNTHAN Balasingam², 冯德成¹

(1.哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨; 2.华盛顿州立大学 土木与环境工程学院, 99164 美国 华盛顿州)

摘 要:为合理描述多孔沥青混合料在中低温度外界荷载作用下的力学特性,基于增量型本构方程,采用 Weibull 损伤 函数、广义 Maxwell 粘弹模型与 D-P 塑性模型,构建了粘弹塑性损伤模型.以此模型为分析手段,对不同温度和加载速率 下的单轴压缩应力-应变曲线进行拟合,并分析温度与加载速率对模型参数的影响规律.分析结果表明:多孔沥青混合料 粘弹参数随着温度的降低逐步退化成弹性参数,塑性模型中的体积模量和剪切模量也随温度呈现出明显的粘弹特性,塑 性应变产生时对应的应变值与损伤应变阙值基本保持一致,温度及加载速率对于混合料的损伤扩展也有显著影响.构建 的理论模型可以有效表征多孔沥青混合料在常温和低温下受荷时的力学损伤特性.

关键词:道路工程;多孔沥青混合料;粘弹性;塑性;损伤

中图分类号: U416.2 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2014)02-0066-06

Viscoelastic-plastic damage model of porous asphalt mixtures

YI Junyan¹, SHEN Shihui², MUHUNTHAN Balasingam², FENG Decheng¹

(1.School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;2. Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, 99164 WA, USA)

Abstract: To characterize the mechanical behaviors of porous asphalt mixtures under loading at normal and low temperatures, a viscoelastic-plastic damage model, which includes Weibull damage function, Generalized Maxwell and Drucker-Prager model, was presented based on incremental constitutive equation. Experimental data from uniaxial compressive strength tests conducted at different strain rate and different temperature were used to validate the efficacy of the model, and the change rules of model parameters in different temperatures and loading rates were investigated. The test and analysis results show that parameters in viscoelastic model begin to behave like the elastic materials. The volume modulus and shear modulus also show obvious viscoelastic properties along with the changes of temperature and load rate. Additionally the strain plastic strain initializes keep almost same to the critical damage strain, which accommodate to the presented hypothesis. The damage curves of porous asphalt mixtures can also reveal the effects of different temperature and load rate. This model can successfully characterize the damage and mechanical behaviors of porous asphalt mixtures at normal and low temperatures.

Keywords: road engineering; porous asphalt mixture; viscoelasticity; plasticity; damage

由于抗滑、降噪、雨天行驶安全等优点,多孔 沥青混合料愈来愈得到国内外道路工作者的重 视^[1-3].但是,由于空隙较大,容易堵塞,且由于结 构组成与常规密级配沥青混合料不同,强度仅靠 内摩阻力与相对更弱的粘聚力提供,耐久性问题 一直是制约多孔沥青混合料进一步应用的瓶颈, 尤其在季节性冰冻地区使用规模更小^[4-8].多孔 沥青混合料是一种典型的粘弹性材料,在常温下 受荷后沥青或胶浆可以通过松弛作用消散掉部分 应力.但当温度降低时,沥青类材料逐步开始显示 出弹 脆性,一旦破坏就会导致严重的结构 松散^[9-10].

鉴于多孔沥青混合料的以上特点,在季冻区

收稿日期: 2013-02-25.

基金项目: 交通运输建设科技项目(2011318 801670).

作者简介:易军艳(1983—),男,博士,讲师;

冯德成(1968—),男,教授,博士生导师.

通信作者:易军艳, yijunyan@hit.edu.cn.

应用时首先需要明确其力学特性与损伤机制.目前对材料的损伤机理研究可通过宏微观分析试验 手段得到,如图像处理、工业CT扫描技术 等^[11-12].此外,理论模型也可用于损伤特性分 析^[13-14].但是,以往的模型分析大多试验温度为 中高温,对于多孔沥青混合料在较低温度下的损 伤特点,国内外研究仍较少涉及.

由此,本文基于粘弹塑性损伤模型,对多孔沥 青混合料在季节性冰冻地区最不利季节的温度作 用下力学行为进行分析,以期更好地理解其破坏 特性,为进一步的应用提供参考.

1 粘弹塑性损伤本构方程

在构建本构方程之前,作如下假设:1)假设 多孔沥青混合料初始损伤为0;2)多孔沥青混合 料的损伤主轴与应力主轴和应变主轴重合.

1.1 损伤模型

沥青混合料在成型后内部结构即存在不同程度的缺陷与裂纹,尽管这些缺陷与裂纹在混合料内部是离散分布的,但在连续损伤力学中,材料的这些缺陷可使用连续的内部损伤场变量表示.在 岩土及路面领域的研究中,Weibull分布函数被一 些学者用以描述材料内部的损伤过程,其表达式^[13-14]为

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{n}{m} (\varepsilon - \gamma)^{n-1} \mathrm{e}^{\frac{-(\varepsilon - \gamma)^n}{m}}.$$
 (1)

其中:m,n 为模型参数,γ 为损伤时应变门槛值.

假设损伤因子 D 变化率满足 Weibull 分布, 即 $dD/d\varepsilon = \varphi(\varepsilon)$,则损伤因子可写为

$$D = \int_{\gamma}^{\varepsilon} \frac{n}{m} (x - \gamma)^{n-1} \mathrm{e}^{\frac{-(x - \gamma)^n}{m}} \mathrm{d}x = 1 - \mathrm{e}^{\frac{-(\varepsilon - \gamma)^n}{m}}.$$
(2)

在本文中,引入损伤力学中的有效应力概 念,即

$$\overline{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{1 - D}.$$
 (3)

其中: $\bar{\sigma}_{ij}$ 为有效应力张量, σ_{ij} 为 Cauchy 应力张量.在后面的分析中,相关的应力应变都将写成有效应力或有效应变的形式,以更真实地描述损伤的演化.

1.2 粘弹性模型

国内外一般使用简单的机械模型组合来描述 沥青混合料的粘弹特性,如 Burgers、Kelvin、 Maxwell和广义 Maxwell模型等.本文对多孔沥青 混合料进行单轴压缩试验,采用的是位移控制模 式,即保持应变速率不变,探讨应力随时间与应变 的变化情况.已有研究表明,广义 Maxwell 模型适用于描述恒应变率加载下的材料粘弹性为.为简 化模型参数,选择 2 个 Maxwell 模型与 1 个弹簧 并联,模型如图 1 所示.



图 1 广义 Maxwell 模型

该模型的连续方程可使用积分形式表示^[15]为

$$\overline{\sigma} = E_0 \overline{\varepsilon} + \int_0^t G_1(t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau + \int_0^t G_2(t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau + \int_0^t G_2(t - \tau) \varepsilon(\tau) d\tau = E_0 \overline{\varepsilon} + \lambda_1 \varepsilon(1 - e^{-t}) + \lambda_2 \varepsilon(1 - e^{-t}).$$
(4)

式中: t_1 、 t_2 为松弛时间, $t_1 = \lambda_1/E_1$, $t_2 = \lambda_2/E_2$; ε 为应变率;G为松弛模量,MPa; E_0 、 E_1 、 E_2 为弹性 模量分量; λ_1 、 λ_2 为粘度分量.

积分型本构方程当进行数据拟合时,需对其 离散化,即构建增量型本构方程,因此改写式 (4)为

$$\Delta \overline{\varepsilon}^{ve} = \mathrm{d} \overline{\varepsilon}^{ve} = \frac{\Delta \overline{\sigma} - \overline{\sigma}_2^{\iota} (\mathrm{e}^{-\frac{\Delta \iota}{\iota_1}} - 1) - \overline{\sigma}_3^{\iota} (\mathrm{e}^{-\frac{\Delta \iota}{\iota_2}} - 1)}{E_0 + E_1 \mathrm{e}^{-\frac{\Delta \iota}{2\iota_1}} + E_2 \mathrm{e}^{-\frac{\Delta \iota}{2\iota_2}}}.$$
(5)

其中: σ_2 为由 λ_1 、 E_1 组成的 Maxwell 模型应力, σ_3 为由 λ_2 、 E_2 组成的 Maxwell 模型应力, σ 为模型整体应力.

1.3 塑性模型

在选择塑性模型时,现有常用的屈服函数包括 Tresca、Von Mises、Mohr-Coulomb 与 Drucker-Prager 屈服准则等.其中 Tresca 屈服函数即为最 大剪应力理论,其函数曲线存在尖角,不利于数值 计算,这也是 Mohr-Coulomb 屈服函数的问题.因 此最终屈服函数选择应用广泛的 Drucker-Prager 模型,该模型屈服函数在 π 平面的投影为光滑连 续的圆形,且考虑了静水压力的影响.其屈服函数 形式为^[16]

 $f(\bar{\sigma}_{ij},k) = a\bar{I}_1 + \sqrt{J_2} - k(\bar{\varepsilon}_p) = 0.$ (6) 其中: I_1 为第一主应力张量不变量, J_2 为第二偏应 力张量不变量,k为各向同性硬化参数, $\bar{\varepsilon}_p$ 为累计 塑性应变,a为模型参数.

在屈服面上, df = 0, 即上式可写为

$$\mathrm{d}f = \frac{\partial f}{\partial \overline{\sigma}_{ii}} \mathrm{d}\overline{\sigma}_{ij} + \frac{\partial f}{\partial k} \mathrm{d}k. \tag{7}$$

在选取塑性流动规则时,已有研究表明沥青 混合料的力学行为符合非关联流动法则^[17-19],即 塑性势函数 g 并不等于屈服函数 f.为了得到非关 联塑性模型,Drucker-Prager 塑性势函数采用与屈 服函数类似的结构形式,仅将其中的参数 a 变为 参数 b,有

$$g = b\bar{I}_1 + \sqrt{\bar{J}_2}.$$
 (8)

因此,流动法则可表示为

$$d\overline{\varepsilon}_{ij}^{p} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \overline{\sigma}_{ij}} = \frac{1}{H} \cdot \frac{\partial f}{\partial \overline{\sigma}_{mn}} \cdot \frac{\partial g}{\partial \overline{\sigma}_{ij}} \cdot d\overline{\sigma}_{mn}, \quad (9)$$

$$d\lambda = \frac{\left(a\delta_{mn} + \frac{1}{2\sqrt{J_{2}}} \cdot \overline{s}_{mn}\right) \cdot C_{mnkl} \cdot d\overline{\varepsilon}_{kl}}{\left(a\delta_{pq} + \frac{1}{2\sqrt{J_{2}}} \cdot \overline{s}_{pq}\right) \cdot C_{pqts} \cdot \frac{\partial g}{\partial \overline{\sigma}_{ts}} + H} = \frac{\left(a\delta_{mn} + \frac{1}{2\sqrt{J_{2}}} \cdot \overline{s}_{mn}\right) \cdot C_{mnkl} \cdot d\overline{\varepsilon}_{kl}}{h}.$$

(10)

式中:H为硬化模量, $d\lambda$ 为正比例标量, δ_{ij} 为克罗 内克符号, C_{ijkl} 为弹性常数张量.

如前所述,为了更好地验证模型,引入有效应 力与有效应变的概念.对于本文的验证试验,加载 模式为单轴压缩.因此有效应力 ō_a 可表示为

$$\overline{\sigma}_{e} = \frac{\sqrt{3}\,a\overline{I}_{1} + \sqrt{3}\overline{J}_{2}}{1 + \sqrt{3}\,a}.$$
(11)

而有效塑性应变可用增量形式表达为

$$d\overline{\varepsilon}_{p} = \frac{a + \frac{1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3a^{2} + 0.5}} \sqrt{d\overline{\varepsilon}_{ij}^{p}} d\overline{\varepsilon}_{ij}^{p}.$$
 (12)

塑性模量定义为 $H_p = \frac{d\bar{\sigma}_e}{d\bar{\varepsilon}_o}$,且单轴方向 h 为

$$h = G + 9Kab + \frac{b\bar{I}_1 + \sqrt{\bar{J}_2}}{k} \left(a + \frac{\sqrt{3}}{3}\right)^2 \cdot H_p.$$
(13)

其中: G 为剪切模量, MPa; K 为体积弹性模量, MPa.

由此可求得塑性应变增量 d*ε^p_{ij}*,并将总应变 增量表示为

$$d \overline{\varepsilon_{ii}} = d \overline{\varepsilon_{ii}^{ve}} + d \overline{\varepsilon_{ii}^{p}}.$$
 (14)

2 试 验

2.1 试验材料

试验用集料为玄武岩,其粗集料技术指标为: 针片状含量 10.1%,小于 0.075 mm 的颗粒的质 量分数为 0.3%, 压碎值 10.0%, 粘附性等级为 4 级.

沥青为橡胶沥青,其 25 ℃ 针入度为 62.3 (0.1 mm),软化点 θ_{R&B} 为 63.6 ℃,RTFOT 后残 留针入度比为 61.1%,180 ℃粘度为 2.31 Pa・s, 25 ℃弹性恢复 86.3.

试验多孔沥青混合料参考公路行业规范推荐级配范围,经过对比体积指标与性能要求确定级配^[20].其关键筛孔通过率如下:16 mm 筛孔通过率为 95%,4.75 mm筛孔通过率为 20%,2.36 mm 筛孔通过率为 15%,0.075 mm 筛孔通过率为 4%.沥青用量为 5.2%.

2.2 试验方法

试验用多孔沥青混合料试样高度与直径均为 100 mm,采用旋转压实仪直接成型,空隙率控制 在 18%±1%.加载采用单轴压缩模式,试验温度分 别为-10、0、10、20 °C,在每种温度下施加不同应 变率荷载,直至试样完全破坏.具体加载速率如 下:-10 °C下为2、1、0.5 mm/min;0 °C下为5、2、 1 mm/min;10 °C下为12.5、5、2 mm/min; 20 °C下 为50、5、2 mm/min.

试验过程中采集荷载与位移,并转化为应力 与应变.每种试验条件下制备4或5个平行试样, 在加载之前,对试样施加小应力预压.试验系统为 MTS810型电液伺服试验设备.在模型中,一共有 12个模型参数需要确定,即损伤模型中的m,n, $\gamma,粘弹性模型中的E_0,E_1,E_2,\lambda_1,\lambda_2,塑性模型中$ 的<math>K,G,a,b.由于粘弹性模型中松弛时间 $t_1 = \lambda_1/E_1$,因此粘弹性模型中的5个参数选用 $E_0,$ $E_1,E_2,t_1,t_2.$ 参数的确定过程包括首先根据经验 对其拟定初始值,然后采用最小平方法进行非线 性拟合,拟合工具采用Excel中规划求解功能,设 置迭代次数与允许误差,控制模型拟合与试验结 果误差平方和最小,以确定模型参数.

3 试验结果与模型分析

3.1 试验结果与模型拟合

图 2 为不同温度下 2 mm/min(0.000 3/s)加 载速率时的试验结果与模型拟合.可以看到对于 不同温度时的应力应变曲线,模型可很好地进行 模拟.



图 2 不同温度 0.000 3/s 加载速率下压缩试验结果与模型拟合

图 3、4 分别为 20 ℃与-10 ℃时的试验结果 与模型 拟合.由于篇幅所限,本文并没有给出 10 ℃与0 ℃下的试验数据.但从 4 种温度下的试 验数据与模型拟合结果看,模型在 0 ℃以上与试 验数据拟合较好,当温度下降到-10 ℃时,由于沥 青混合料将显示出更多的弹性,其力学性能对加 载速率的依赖性减弱.因此,图 4 中,无论是试验 结果还是模型拟合,多孔沥青混合料的加载应力 应变曲线都受加载速率影响较小.



图 3 20 ℃不同加载速率下单轴压缩强度试验结果与模型拟合





3.2 模型有效性分析

由图 2~4 可知当温度较高或加载速率不大时,模型拟合情况较好,但是模型在描述多孔沥青 混合料在低温下力学行为的有效性方面还需进一 步分析.模型参数的取值和变化是影响模型精度 的重要因素.参数的变化意味着混合料某些力学 特性的改变,对于判断材料属性的变化规律有较 大的帮助.

在前文的粘弹性模型中,假设在固定温度下的 粘弹属性不变,加载速率的影响可以通过模型反 映.最终得到温度与各项参数之间的关系如 图 5 所示. 可以看到随着温度的降低, *E*₀、*E*₁、*E*₂、*t*₁ 与 *t*₂ 都有不同程度的上升.但其中 *E*₁ 和 *E*₂ 当温度 降低到0 ℃ 以下时变化趋势减弱,表明粘弹性模型 中粘弹构件作用降低,材料开始显示出更多的弹性 属性,也因此弹性模量尽管有所波动,但维持在同 一水平. *t*₁ 与 *t*₂ 表征了材料松弛应力的能力,时间越 短,表明材料具有更好松弛特性,也显示出更明显 的粘弹特征.因此总的来看,材料参数的变化表明: 温度的下降使多孔沥青混合料由粘弹性材料向弹 性材料转化,材料应力松弛能力减弱.



图 5 粘弹参数随温度变化

在塑性模型中,经典弹塑性理论假设剪切模 量 *G* 和体积弹性模量 *K* 为常量,不随温度或加载 速率的变化而改变.但是对于多孔沥青混合料这 种典型的粘弹性材料,其模量也应具有温度或频 率敏感性.图6、7分别为*G*与*K*在温度与加载速率 变化时的取值.尽管试验结果为离散的数据点,但 通过数据回归可以绘出其变化规律.







图 7 体积弹性模量 K 随温度与加载速率变化

粘弹性材料的一个重要特征就是时温等效 性,即温度变化导致的性能改变也可以通过改变 加载时间(或加载频率)得到.同时,粘弹性材料的 力学特性(动态模量等)随温度或频率的变化呈 "S"形状,即在固定温度下存在一个敏感频率范 围,在这个范围内材料属性变化明显,当频率过低 或过高时,材料属性随频率变化的幅度减小.从图 6、7可以看到,多孔沥青混合料的剪切模量*G*和体 积弹性模量*K*随温度或加载速率呈明显的S型变 化,证明了模型中*G*和*K*取值的合理性.

损伤模型中的γ为损伤时应变门槛值,即当 应变大于γ时,认为损伤开始发展.对于受荷变形 的线粘弹性材料,一般认为只要时间足够长其力 学特性就可以恢复.在塑性模型中,每一应变增量 后,通过屈服函数判断是否出现塑性变形,并以此 作为塑性应变产生.本文认为塑性应变的出现即 意味着损伤的开始,而在初始线粘弹性阶段,损伤 等于0.为了验证这个假设,对塑性应变产生时对 应的总应变与损伤时应变门槛值γ进行分析,结 果,见图8.可以看到两者之间有着很好的线性关 系,图中数据点包括不同温度与不同加载速率下 的结果,但是总的趋势依然满足所作的假设.



图 8 塑性应变产生 γ 时对应的总应变与损伤时应变门 槛值比较

对于典型的粘弹性材料,温度和加载速率的 不同,将使材料呈现出不同的损伤行为.低温和 高加载速率下材料显示出弹脆性,而高温和低加 载速率下材料更倾向于粘塑性.对上述不同温度 及加载速率下多孔沥青混合料的损伤特性进行分 析,结果如图9、10所示.为更好地比较温度的影 响,图中仅给出 20℃与-10℃下的曲线.



可以看到,当温度为 20 ℃时,0.000 33/s(即

2 mm/min)的加载速率下多孔沥青混合料显示出 更多的粘弹性,在这种情况下损伤从一开始加载 就出现并缓慢增长,直到混合料不再能抵抗外荷 载.而当加载速率增大时,混合料逐渐显示出明显 的弹脆性,即在一定弹性范围内变形可以恢复,损 伤为0,但是一旦超过这个弹性范围,损伤迅速发 展,混合料很快出现脆性开裂破坏.

对于-10℃时的损伤曲线,由于温度较低,沥 青混合料更趋向于显示出弹性,此时混合料特性 受加载速率的影响相对要小很多,因此,在不同加 载速率下,损伤曲线基本相同.

对于弹脆性材料,直观上看,材料越硬(即温 度越低,加载速率越大),相对应的损伤起始时间 就越大,并且损伤扩展的速率也越快.图 11 为 4 种温度时 0.000 33/s(即 2 mm/min)加载速率下 混合料的损伤曲线,即单纯考虑温度对损伤特性 的影响.由于本文假设塑性变形的出现即为损伤 的初始,因此温度越低,出现塑性变形的时间将越 长,导致初始损伤发生时的应变也越大.此外,温 度的高低直接决定了损伤的扩展速率.低温下的 弹脆特性将带来较快的损伤速率,而温度较高时, 材料的损失扩展行为更为缓慢.



图 11 4 种温度固定加载速率下混合料损伤曲线

4 结 论

1)不同温度与加载速率下多孔沥青混合料的应力-应变曲线显示出明显的粘弹效应.在高温与低应变率下,多孔沥青混合料呈现出粘弹塑性破坏;而当温度较低或应变率高时,其表现为弹脆性破坏.

 2)构建的粘弹塑性损伤模型可以有效反映 多孔沥青混合料在较低温度下的力学行为.

3)由理论模型参数随温度及加载速率的变化规律可知,随着温度的降低,多孔沥青混合料模量逐步增加,但是到一定值后升高幅度降低,同时材料应力松弛能力减弱.

4)随着温度及加载速率的变化,多孔沥青混 合料剪切模量和体积弹性模量也呈现出"S"型变 化.损伤曲线的变化规律也证明了构建理论模型 的合理性.

参考文献

- [1] ALVAREZ A E, MARTIN A E, ESTAKHRI C K, et al. Synthesis of current practice on the design, construction, and maintenance of porous friction course
 [R]. Texas: Texas Transportation Institute and The Texas A&M University System, 2006.
- [2] 曹东伟,刘清泉,唐国奇.排水沥青路面[M].北京: 人民交通出版社,2010.
- [3] MUNDEN H J, PIERCE L M, MAHONEY J P, et al. Low noise pavement evaluation in Washington State [C]//TRB Annual Meeting. Washington: Transportation Research Board, 2008:1–14.
- [4] POULIKAKOS L, TAKAHASHI S, PARTL M. A comparison of Swiss and Japanese porous asphalt through various mechanical tests [C]//3rd Swiss Transport Research Conference. Monte Verità/Ascona: Swiss Transport Research, 2004:1-12.

- [5] Danish Road Institute. Noise reducing pavements-state of the art in Denmark [R]. Denmark: Road Directorate, Ministry of Transport-Denmark, 2005.
- [6] YILDIRIM Y, DOSSEY T, FULTS K, et al. Cold weather performance of new generation open graded friction courses [R]. Texas: Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2007.
- [7] 诸永宁. 排水性沥青路面排水性能研究与排水设施 的设计[D]. 南京:东南大学,2004.
- [8] SCHAUS L, TIGHE S, UZAROWSKI L. Porous asphalt pavement designs: Canadian climate use [C]//TRB Annual Meeting. Washington: Transportation Research Board, 2008:1-21.
- [9] MOHAN S. Winter damage of porous asphal-case study using a meso-mechanics based tool for lifetime optimization of PA[D]. Netherland: Delft University of Technology, 2010.
- [10] LEBENS M. Porous asphalt pavement performance in cold regions [R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation Research Services, 2009.
- [11] WANG L B, FROST J D, VOYIADJIS G Z, et al. Quantification of damage parameters using X-ray tomography images[J]. Mechanics of Materials, 2003, 35(8):777-790.
- [12]肖源杰,倪富健,蒯海东,等.基于图像的粗集料形态对沥青面层抗剪性能的影响[J].郑州大学学报: 工学版,2006,27(4):44-48.
- [13]郑健龙,吕松涛,田小革.基于蠕变试验的沥青粘弹 性损伤特性[J].工程力学,2008,25(2):193-196.
- [14] 邵腊庚,周晓青,李宇峙,等.基于直接拉伸试验的沥青混合料粘弹性损伤特性研究[J].土木工程学报,2005,38(4):125-128.
- [15]易军艳. 基于界面行为的多孔沥青混合料冻融损伤 特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [16] CHEN W F, HAN D J. Plasticity for structural engineers[M]. FL Fort Lauderdale: J Ross Publishing Inc, 2007.
- [17] DARABI M K, ABU A R K, MASAD E A, et al. A thermo-viscoelastic-viscoplastic-viscodamage constitutive model for asphaltic materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(1): 191-207.
- [18] FLOREA D. Nonassociated elastic/viscoplastic model for bituminous concrete [J]. International Journal of Engineering Science, 1994, 32(1): 87-93.
- [19] CHEHAB G. Characterization of asphalt concrete in tension using a viscoelastoplastic model [D]. North Carolina: North Carolina State University, 2002.
- [20] JTG F40—2004.公路沥青路面施工技术规范[S]. 北 京:中华人民共和国交通部,2004.

(编辑 魏希柱)