

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.020

沥青混合料 GLS 模型的应用和简化

杜庆灿, 韩丁, 周鹏鸿

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章在保持广义西格摩德(Generalized Logistic Sigmoidal, GLS)模型适用性的前提下,根据沥青混合料的特点固定部分模型参数能提高该模型的便捷性和应用价值,分别采用沥青混合料存储、存储和耗散、动态模量的实验数据建立 3 种残差拟合函数,并比较 3 种函数采用不同位移因子构建各类主曲线的差异性。当沥青混合料采用 GLS 模型时,建立方法对参数进行敏感性分级,并基于 65 组实验数据获取可固定的参数值。结果表明:对沥青混合料, GLS 模型适合采用残差函数 $\text{Fit-}E_{\text{dyn}}$ 和位移因子 Kaelble; 参数 λ 和 β 可以固定; 拟合精度要求不高时, 参数 γ 也可以固定。该研究得到的简化 GLS 模型可用于进一步分析较少的模型参数与沥青混合料材料特性的相关性。

关键词:沥青混合料; 广义西格摩德(GLS)模型; 主曲线; 位移因子; 参数敏感性

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)02-0274-09

Application and simplification of GLS model for asphalt mixture

DU Qingcan, HAN Ding, ZHOU Penghong

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: On the premise of maintaining the applicability of the Generalized Logistic Sigmoidal (GLS) model, fixing partial parameters can improve the convenience and application values of the model according to the characteristics of asphalt mixture. Based on test data of asphalt mixture containing storage, storage and loss, and dynamic moduli, three residual fitting functions were established respectively, and the differences of these functions using different shift factors to construct various master curves were compared. For the GLS model describing asphalt mixture, a new method was established to classify the sensitivity of the parameters, and then fixed values of the insensitive parameters were obtained based on 65 groups of test data. The results show that the GLS model is suitable to use the residual function $\text{Fit-}E_{\text{dyn}}$ and the shift factor Kaelble for asphalt mixture; the parameters λ and β can be fixed; in addition, the parameter γ can also be fixed when the requirement for fitting accuracy is not high. This work can be used to further analyze the correlation between fewer model parameters of the simplified GLS model and material properties of asphalt mixture.

Key words: asphalt mixture; Generalized Logistic Sigmoidal (GLS) model; master curve; shift factor; parameter sensitivity

0 引言

沥青混合料是显著依赖于温度和加载频率的材料,在线黏弹性范围内采用主曲线描述沥青混合料的材料性能是综合考虑这两者影响的一种通

用方法。西格摩德(Sigmoidal, SM)模型是《力学-经验路面设计指南》(NCHRP 01-37A)^[1]中提出的经验数学方程,被广泛用于构建沥青混合料主曲线。为描述主曲线的非对称形状,在 SM 模型中引入了一个附加参数 λ ,称为广义西格摩德

收稿日期:2023-03-20;修回日期:2023-06-04

基金项目:交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室开放课题资助项目(KF2021-02)

作者简介:杜庆灿(1997—),男,山东菏泽人,合肥工业大学硕士生;

韩丁(1982—),男,安徽肥东人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:handing@hfut.edu.cn.

(Generalized Logistic Sigmoidal, GLS) 模型^[2]。大量研究已经证明 SM 和 GLS 模型能合理构建出沥青混合料各类模量和柔度的主曲线。多种因素会导致沥青混合料各类模量主曲线出现显著分散,其中位移因子和函数形式在不确定度的量化中起着重要作用。采用位移因子 Free-shifting、Arrhenius、威廉·兰德尔·费里(William-Landel-Ferry, WLF)和 Kaelble 来构建蠕变柔度 $D(t)$ 和松弛模量 $E(t)$ 的主曲线, SM 模型使用 Kaelble、Arrhenius、WLF 和 Free-shifting 会导致最小到最大的不确定性,而 GLS 模型引起的不确定性会小于 SM 模型^[3]。采用 SM 模型和二阶多项式(second-order polynomial, SOP)进行联合使用来构建动态模量主曲线,结果表明 SM 模型能够准确预测 2 种高模量沥青混合料的高低温性能^[4]。

对玄武岩纤维改性沥青混合料,位移因子 WLF、Arrhenius 和对数线性(log-linear, LL)分别与 GLS 模型联合使用来构造复模量主曲线,结果表明相关系数都大于 0.97^[5]。对于片麻岩改性沥青混合料,采用 SM 模型和 SOP 位移因子能够拟合动态模量主曲线,结果表明相关系数大于 0.98,相关性较高^[6]。联合采用 SM 模型和 WLF 位移因子构建动态模量主曲线,结果表明 SM 能够较好地拟合动态模量主曲线^[7]。为更好地研究 SMA13、Superpave20 和 Superpave25 沥青混合料的动态特性,采用 SM 模型和 Arrhenius 位移因子联合使用构建动态模量主曲线^[8]。为分析直接拉伸的松弛模量数据, GLS 模型分别与 5 种位移因子 Numerical、LL、WLF、改良 Kaelble(modified kaelble, MK)和 Arrhenius 联合使用构建松弛模量主曲线^[9]。为评价冻融循环对沥青混合料的影响,分别使用高性能沥青路面回转压实(superpave gyratory compaction, SGC)取样和切割的方法获取试件,并用 GLS 模型和位移因子 WLF 构建复模量的主曲线^[10]。

虽然包含 5 个参数的 GLS 模型已被证明具有合理构建沥青混合料主曲线的能力,但更少的参数意味着更高的实用性。因此,有必要研究沥青混合料采用 GLS 模型时各参数敏感性和是否存在可固定的参数。

1 构造主曲线的方法

利用时-温等效原理,通过位移因子将所有实验数据转换为该参考温度下的等效实验数据。

1.1 位移因子的描述

利用时-温等效原理对实验数据转换时,不同的位移因子会生成不同的等效实验数据。

文献[3]中位移因子 Arrhenius 表示为:

$$\lg \alpha_T = \frac{\Delta E_a}{2.303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (1)$$

其中: ΔE_a 为流体的活化能; R 为气体常数,取为 8.314 J/(mol·K); 参考温度 T_{ref} 和试验温度 T 采用绝对温度值。

文献[3]中位移因子 WLF 表示为:

$$\lg \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (2)$$

其中: C_1 、 C_2 为待定参数; T_{ref} 为参考温度; T 为试验温度。

文献[3]中位移因子 Kaelble 表示为:

$$\lg \alpha_T = -K_1 \left(\frac{T - T_d}{K_2 + |T - T_d|} - \frac{T_{ref} - T_d}{K_2 + |T_{ref} - T_d|} \right) \quad (3)$$

其中: K_1 、 K_2 为待定参数; T_{ref} 为参考温度; 待定参数 T_d 为温度拐点; T 为试验温度。

文献[4]中位移因子 SOP 表示为:

$$\lg \alpha_T = a(T - T_{ref})^2 + b(T - T_{ref}) + c \quad (4)$$

其中: a 、 b 、 c 为待定参数; T_{ref} 为参考温度; T 为试验温度。

文献[5]中位移因子 LL 表示为:

$$\lg \alpha_T = C(T - T_{ref}) \quad (5)$$

其中: C 为待定参数; T_{ref} 为参考温度; T 为试验温度。

文献[9]中位移因子 MK 表示为:

$$\lg \alpha_T = -\frac{M_1(T - T_{ref})}{M_2 + |T - T_{ref}|} \quad (6)$$

其中: M_1 、 M_2 为待定参数; T_{ref} 为参考温度; T 为试验温度。在某一参考温度 T_{ref} 下,特征时间 τ 计算公式为:

$$\tau = \alpha_T \tau_{ref} \quad (7)$$

其中: α_T 为在温度 T 下的位移因子,可在式(1)~(6)中选择使用; τ_{ref} 为参考温度 T_{ref} 下的特征时间。

在某一参考温度 T_{ref} 下,减缩频率 ω_r 计算公式为:

$$\omega_r = \alpha_T \omega \quad (8)$$

其中: ω 为温度 T 下的角频率。

1.2 GLS 的描述

复数、动态、存储和耗散模量常用来描述沥青混合料的线性黏弹性,这些模量的关系表达式为:

$$E^*(i\omega_r) = E'(\omega_r) + iE''(\omega_r) \quad (9)$$

$$E_{\text{dyn}}(\omega_r) = |E^*(i\omega_r)| = \sqrt{(E'(\omega_r))^2 + (E''(\omega_r))^2} \quad (10)$$

其中: $E^*(\omega_r)$ 为复数模量; $E'(\omega_r)$ 、 $E''(\omega_r)$ 、 $E_{\text{dyn}}(\omega_r)$ 分别为存储、耗散和动态模量; ω_r 为减缩频率。

对等效实验数据进行拟合,作为一种在沥青混合料中广泛使用的主曲线函数形式,选用 GLS 模型作为表征沥青混合料存储模量主曲线的材料本构模型,计算表达式^[11]为:

$$\lg E(\omega_r) = \delta + \frac{\alpha}{[1 + \lambda \exp(\beta + \gamma \lg \omega_r)]^{\frac{1}{\lambda}}} \quad (11)$$

其中: $\delta + \alpha$ 和 δ 分别为存储模量主曲线的上、下渐近线值; λ 、 β 、 γ 为存储模量主曲线的形状控制系数。

存储和耗散模量的关系采用近似克拉默斯·克罗尼格(Kramers-Kronig, K-K)法则,计算表达式^[12]为:

$$E''(\omega_r) \approx \frac{\pi}{2} \frac{dE'(\omega_r)}{d \ln \omega_r} \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)得到耗散模量主曲线的表达式,即

$$\begin{aligned} \lg E''(\omega_r) = & \lg\left(-\frac{\pi}{2}\gamma\right) + (\beta + \gamma \lg \omega_r) \lg e - \\ & \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) \lg[1 + \lambda \exp(\beta + \gamma \lg \omega_r)] + \\ & \delta + \frac{\alpha}{[1 + \lambda \exp(\beta + \gamma \lg \omega_r)]^{\frac{1}{\lambda}}} \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $E''(\omega_r)$ 为耗散模量; 其他参数与式(11)相同。将式(11)和式(13)代入式(10),得到与 GLS 模型相关的动态模量表达式。

1.3 采用不同实验数据的拟合函数

将式(10)、式(11)、式(13)分别记为拟合函数 $F_{\text{dyn}}^{\text{fit}}$ 、 $F_{\text{store}}^{\text{fit}}$ 、 $F_{\text{loss}}^{\text{fit}}$ 。由于存在 ω_r , 每个函数中需要拟合的参数都包含选用位移因子的待定参数和 GLS 模型的材料参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 。将沥青混合料动态模量、存储模量和耗散模量的实验数据分别记为 $E_{\text{dyn}}^{\text{data}}$ 、 $E_{\text{store}}^{\text{data}}$ 、 $E_{\text{loss}}^{\text{data}}$ 。

基于不同频率 ω 和温度 T 组合下的室内实验可以获得沥青混合料各模量的实验数据。以存储模量为例, $E_{\text{store}}^{\text{data}}[\omega(j), T(k)]$ ($j=1, \dots, a; k=1, \dots, b$) 表示有 a 种频率和 b 种温度组合下的存储模量实验数据,共有 $a \times b$ 组数据。当给定一个参考温度 T_{ref} 时,选用合适的拟合函数和位移因子对实验数据进行拟合,可以得到该参考温度下

的存储模量主曲线。例如,采用拟合函数 $F_{\text{store}}^{\text{fit}}$ 和位移因子 WLF 对 $E_{\text{store}}^{\text{data}}$ 进行拟合,可得到材料参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 的值和 WLF 的 C_1 、 C_2 值。在该拟合过程中,位移因子 WLF 会通过式(8)将 $E_{\text{store}}^{\text{data}}$ 转换为使用减缩频率的实验数据 $E_{\text{store}}^{\text{test}}(i)$ (其中 $i=1, 2, 3, \dots, a \times b$), 简记为 $E_{\text{store}}^{\text{test}}(i)$ 。将拟合得到的材料参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 值代入 $F_{\text{store}}^{\text{fit}}$, 分别计算出 $\{\omega_r(i)\}$ 处存储模量的拟合数据 $E_{\text{store}}^{\text{fit}}[\omega_r(i)]$ (其中 $i=1, 2, 3, \dots, a \times b$), 简记为 $E_{\text{store}}^{\text{fit}}(i)$ 。按照类似的方法,可以得到 $E_{\text{loss}}^{\text{fit}}(i)$ 、 $E_{\text{loss}}^{\text{test}}(i)$ 、 $E_{\text{dyn}}^{\text{fit}}(i)$ 和 $E_{\text{dyn}}^{\text{test}}(i)$ 。

构建 3 种残差函数 $\text{Fit}_- E'$ 、 $\text{Fit}_- E' \& E''$ 和 $\text{Fit}_- E_{\text{dyn}}$, 分别采用沥青混合料存储模量、存储和耗散模量、动态模量的实验数据进行拟合,其表达式为:

$$E' = \left| \frac{E_{\text{store}}^{\text{fit}}(i) - E_{\text{store}}^{\text{test}}(i)}{E_{\text{store}}^{\text{test}}(i)} \right| \quad (14)$$

$$E' \& E'' = \lambda_1 \left| \frac{E_{\text{store}}^{\text{fit}}(i) - E_{\text{store}}^{\text{test}}(i)}{E_{\text{store}}^{\text{test}}(i)} \right| + \lambda_2 \left| \frac{E_{\text{loss}}^{\text{fit}}(i) - E_{\text{loss}}^{\text{test}}(i)}{E_{\text{loss}}^{\text{test}}(i)} \right| \quad (15)$$

$$E_{\text{dyn}} = \left| \frac{E_{\text{dyn}}^{\text{fit}}(i) - E_{\text{dyn}}^{\text{test}}(i)}{E_{\text{dyn}}^{\text{test}}(i)} \right| \quad (16)$$

其中, λ_1 和 λ_2 是权重系数,满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, 可根据沥青混合料分析时存储模量和耗散模量的重要性进行合理分配。

2 研究方法的比较与分析

2.1 GLS 和位移因子的材料范围

本文采用 GLS 模型对沥青混合料的实验数据进行大量的试算,并给出参数拟合范围,见表 1 所列。

表 1 GLS 模型的参数拟合范围

参数	下限	上限
δ	-2.00	4.00
α	1.00	6.00
λ	1.50	2.00
β	-0.50	-0.20
γ	-0.65	-0.45

2.2 位移因子差异性的比较

分别选取工程上常用的密级配沥青混合料 AC13^[12] 和沥青玛蹄脂混合料 SMA13^[13] 的动态模量实验数据,其实验流程都符合我国《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[14] 和美国国家公路协会规范(AASHTO T

342-11—2019)^[15]的要求。基于 GLS 模型和残差函数 $Fit-E_{dyn}$, 分别采用式(1)~(6)所示的 6 种位移因子对 2 组实验数据分别进行动态模量主曲线的拟合, 结果如图 1 所示。

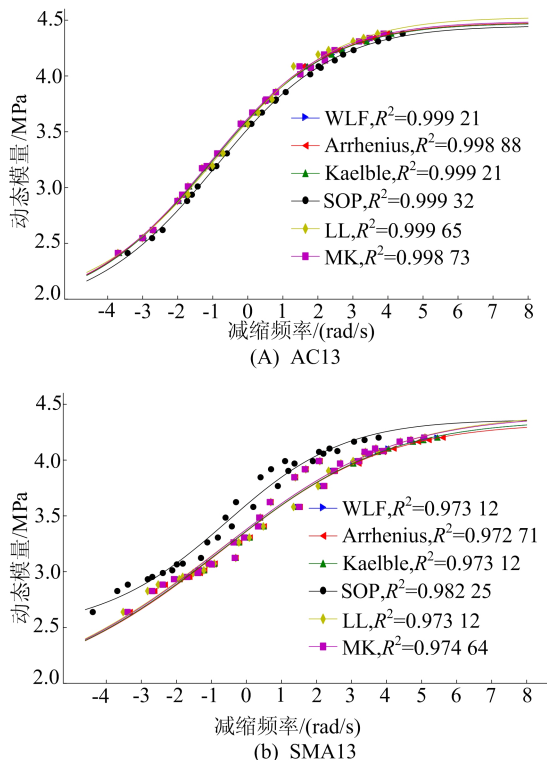


图 1 不同位移因子对沥青混合料动态模量主曲线的影响

由图 1 可知, 间断级配 SMA13 采用 6 种位移因子时构造出的 6 个动态模量主曲线明显不如连续级配 AC13 的结果, 特别是位移因子 SOP。通过其他 AC13 和 SMA13 数据的分析也得到了类似的规律。此外, 当 SOP 位移因子的参数 c 不为 0 且实验温度 T 等于参考温度 T_{ref} 时, α_T 不等于 1, 这与其他位移因子假设不符。选用位移因子 WLF 拟合主曲线时, 当 $C_2 + (T - T_{ref}) = -1$ 时会变为 LL 位移因子。本文选用 4 种位移因子 (Arrhenius、WLF、Kaelble 和 MK) 进行后续研究。

2.3 GLS 材料范围的合理性验证

为验证表 1 中给出的 GLS 模型材料参数范围的合理性, 将残差函数 $Fit-E_{dyn}$ 分别与位移因子 Arrhenius、WLF、Kaelble 和 MK 联合使用。为了评价通用性, 选用 65 组沥青混合料动态模量实验数据, 主要包括密级配沥青混合料^[5,12,16-29]、沥青玛蹄脂混合料^[10,13] 和其他类型的沥青混合料^[11,22,26,30-32]。对这些实验数据进行动态模量主曲线拟合, 结果如图 2 所示。

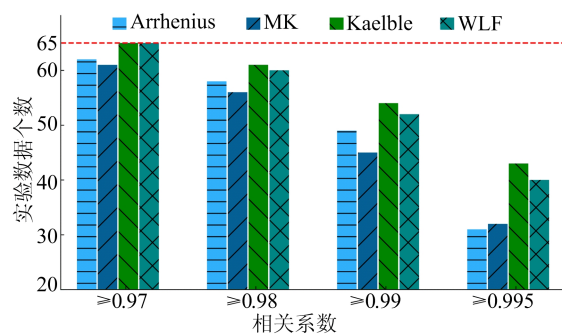


图 2 拟合参数范围的合理性验证

由图 2 可知, 使用 Kaelble 时大于各档 R^2 值的实验数据个数都是最高。WLF 要稍微差一些, 且在高 R^2 值时会更加明显。相对来说, 残差函数 $Fit-E_{dyn}$ 与 Arrhenius 和 MK 的组合明显较差。采用 WLF 和 Kaelble 拟合 65 组沥青混合料实验数据时, 动态模量主曲线的 R^2 值都超过了 0.97, 因此给出的材料参数范围适用于沥青混合料。

2.4 残差函数的比较

在 Arrhenius、WLF、Kaelble 和 MK 中选取 1 种位移因子, 同时在 $Fit-E_{dyn}$ 、 $Fit-E'$ 、 $Fit-E' \& E''$ 中选取 1 种残差函数, 联合构成 1 种拟合主曲线的组合。不同组合会使用相应的动态、存储和耗散模量实验数据。为了研究这种差异性, 通过以下步骤进行分析:

1) 选择不同的组合拟合各类模量主曲线, 按需要使用图 1 引用文献中 AC13 和 SMA13 的动态、存储和耗散模量实验数据。比较不同组合下动态模量主曲线的 R^2 值和存储与耗散模量主曲线的 R^2 值, 如图 3 所示。

2) 在残差函数 $Fit-E' \& E''$ 中, λ_1 分别选用 0.5 和 0.7 来分析权重系数的影响。

3) 计算拟合优度 R^2 时, $Fit-R^2$ 使用的分析数据为拟合得到的数据; 将 $Fit-R^2$ 拟合得到的材料参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 值代入其他模量表达式, 并将计算得到的数据作为 $cal-R^2$ 使用的分析数据。

由图 3 可知, 某种模量的实验数据更适合用于拟合该模量的主曲线, 这意味着 $Fit-R^2$ 一般要大于 $cal-R^2$, 但采用 Arrhenius 和 $Fit-E' \& E''$ 组合时可能会出现不同的结果。图 3c 的 R^2 值明显大于图 3d 的结果, 这表明与连续级配的 AC13 相比, 间断级配的 SMA13 更适合采用残差函数 $Fit-E_{dyn}$ 。采用残差函数 $Fit-E' \& E''$ 时, 提高 λ_1 值意味着增加存储模量的权重。此时, 能够明显提高存储和动态模量主曲线的 R^2 值, 但同时会降低耗散模量主曲线的 R^2 值。

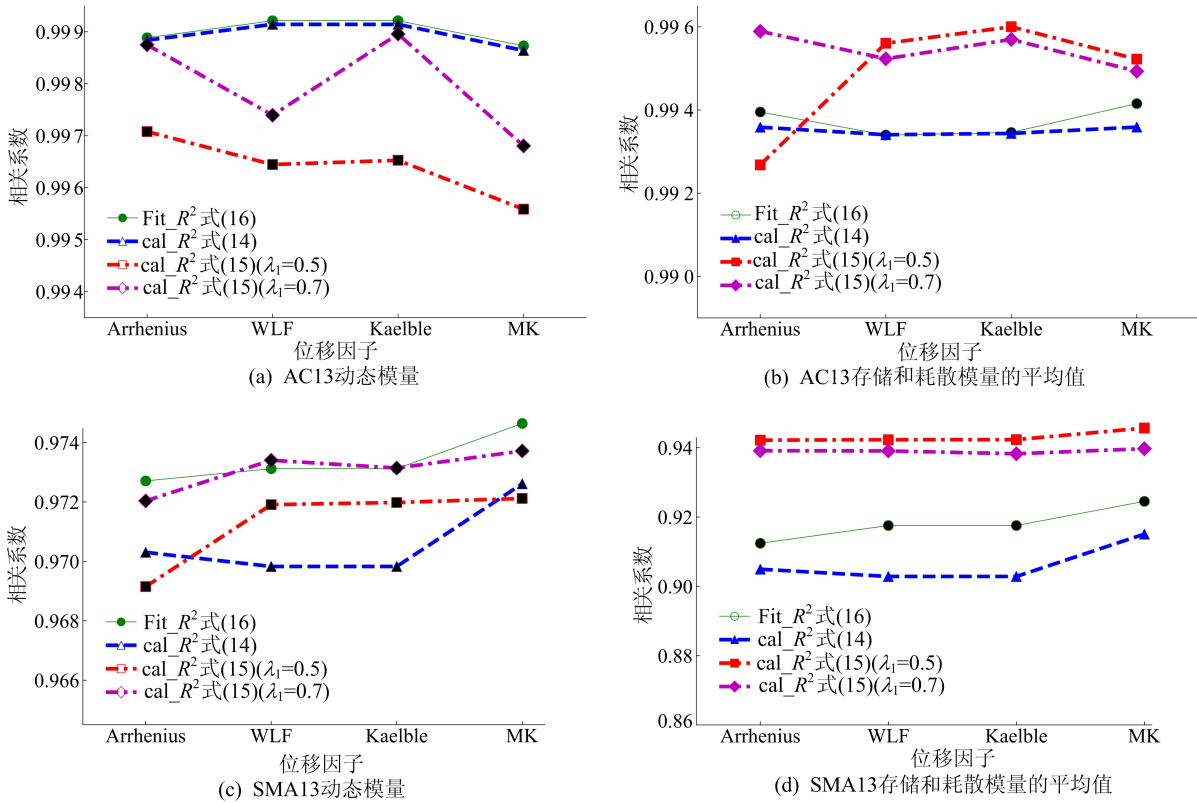


图 3 不同位移因子和残差函数组合时各类模量主曲线的差异性

由图 3 可知,使用残差函数 $\text{Fit}-E_{\text{dyn}}$ 和位移因子 Kaelble 组合拟合动态模量主曲线时能得到更好的结果。

以下采用不同残差函数和 Kaelble 组合对动态、存储和耗散模量主曲线进行拟合,结果如图 4 所示。

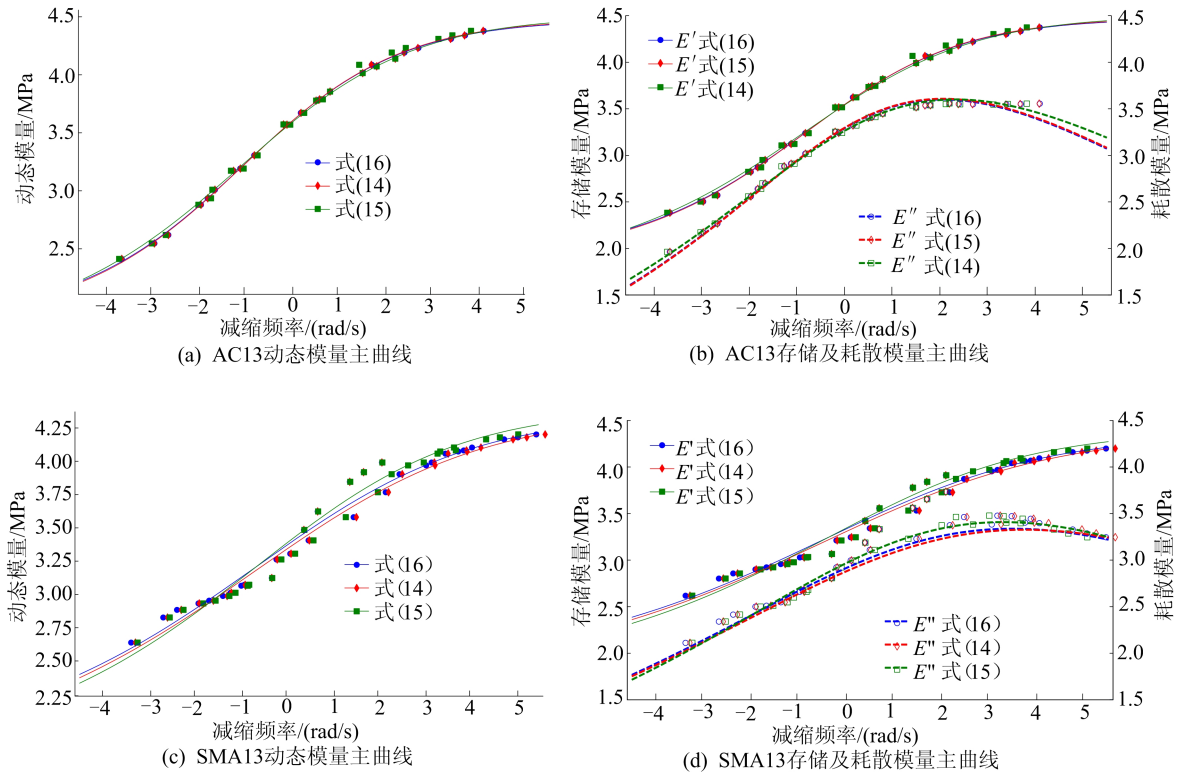


图 4 不同残差函数和 Kaelble 组合时各类模量主曲线的比较

由图 4 可知,拟合动态模量、存储和耗散模量主曲线时,采用 $\text{Fit-}E_{\text{dyn}}$ 、 $\text{Fit-}E'$ 和 $\text{Fit-}E' \& E''$ 得到的结果差异不大,这表明动态模量、存储和耗散模量实验数据都可以被使用。在室内实验中,沥青混合料动态模量的采集较为容易,因此在本文后续的研究中采用残差函数 $\text{Fit-}E_{\text{dyn}}$ 。

3 GLS 参数敏感性研究

3.1 研究原因

在采用 GLS 模型研究沥青混合料的已有文献中,通过沥青混合料动态模量实验数据拟合得到的材料参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 值具有较大的差异性。当 GLS 模型参数的拟合范围和初值不同时,同一组实验数据拟合得到的材料参数值却可能有很大不同,这意味着会出现不唯一的拟合主曲线。

GLS 模型主要包含参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$, 式(11)说明了这些参数在构造主曲线时具有不同的功能。通过大量的试算研究发现,这些参数对于构造主曲线的重要性亦存在差别,即存在参数的敏感性。

3.2 研究方法

在式(10)中,对 1 组给定的 GLS 模型参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 值,给出一系列的减缩频率 ω_r 时可以得到 1 个动态模量主曲线。采用参数敏感性研究(parameter sensitivity research, PSR)的方法来评价 GLS 模型材料参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 的敏感性。

以沥青混合料的材料参数 δ 为例,说明 PSR 方法的分析过程。

1) 减缩频率 ω_r 的范围采用 $10^{-5} \sim 10^5$, 在 $\lg \omega_r$ 的范围内等距划分成 100 份,即 $\omega_r(i)$ ($i=1, 2, 3, \dots, 101$) 得到一系列的减缩频率 $\omega_r(i)$ ($i=1, 2, 3, \dots, 101$)。

2) 参数组合 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 在表 1 所示的范围内等距划分成 4 份,即有 $\delta(j)$ ($j=1, 2, 3, 4, 5$), 其他 4 个参数也类似地进行划分。

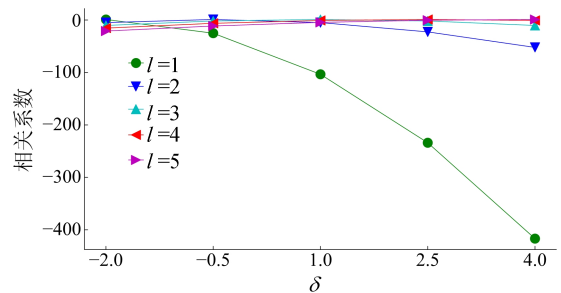
3) $\{\delta(j), \alpha(l), \lambda(l), \beta(l), \gamma(l)\}$ ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 称为第 l 水平,其包含 5 组分析参数组合。将这些参数组合分别代入式(10)得到 5 个动态模量主曲线 $E_{\text{dyn}_1}(l, j)$ ($j=1, 2, 3, 4, 5$)。 $\{\delta(l), \alpha(l), \lambda(l), \beta(l), \gamma(l)\}$ 称为第 l 水平的校对参数组合,代入式(10)得到 l 个动态模量的主曲线 $E_{\text{dyn}}(l)$, 该主曲线上所有动态模量的平均值为 $E_{\text{dyn_mean}}$ 。本文 $l=1, 2, 3, 4, 5$, 即选用了 5 个水平。

4) 建立一个与拟合优度具有相同表达形式的式(17),计算出第 l 水平时材料参数 $\delta(j)$ ($j=1, 2, 3, 4, 5$) 分别对应的 5 个敏感度值 $S_{-f}(l, j)$ ($j=1, 2, 3, 4, 5$)。

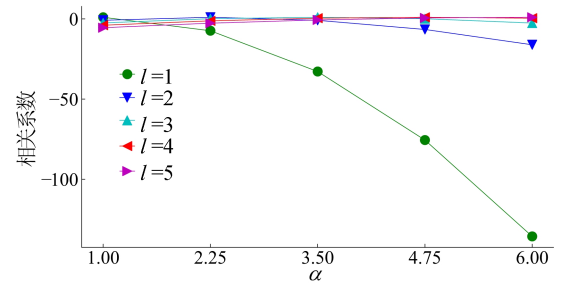
$$S_{-f}(l, j) = R^2 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{101} [E_{\text{dyn}_1}(l, j)_i - E_{\text{dyn_mean}}(l)]^2 \right\}}{\left\{ \sum_{i=1}^{101} [E_{\text{dyn}}(l)_i - E_{\text{dyn_mean}}(l)]^2 \right\}} \quad (17)$$

3.3 参数敏感性分类

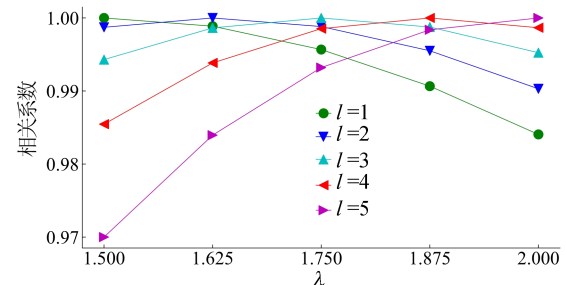
按照上述的 PSR 方法, GLS 模型材料参数 $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 的敏感性分析结果如图 5 所示。



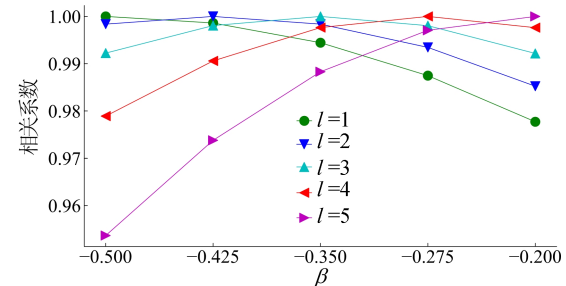
(a) 参数 δ 以外其他参数水平



(b) 参数 α 以外其他参数水平



(c) 参数 λ 以外其他参数水平



(d) 参数 β 以外其他参数水平

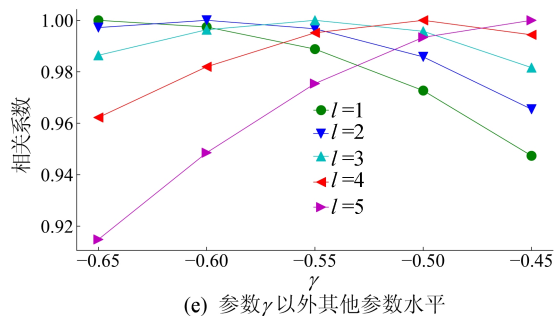


图 5 GLS 模型用于沥青混合料时的材料参数敏感性分析

作为示例,当 $l=1$ 时,即第 1 水平时 $\delta(j)$ ($j=1,2,3,4,5$) 的敏感度值 $S_{-f}(1,j)$ ($j=1,2,3,4,5$) 为图 5a 折线图上的 5 个数据点。 $l=2,3,4,5$ 时的计算结果分别对应图 5a 中的另外 4 个折线图。因为 $\{S_{-f}(l,j)\}$ ($l,j=1,2,3,4,5$) 的最大值严重偏离 1,所以沥青混合料材料参数 δ 的敏感性为强。

由图 5 可知,参数 λ 所有 R^2 值最接近 1,参数 δ 所有 R^2 值最偏离 1。 δ 和 α 取较大值时参数敏感性更强,而 λ,β,γ 取较小值时参数敏感性更强。根据参数的最大 R^2 值偏离 1 的程度判断该参数的敏感性强弱,分类结果见表 2 所列。

表 2 沥青混合料 GLS 模型参数的敏感性分类

敏感性	强	中等	弱
R^2	≤ 0.85	$(0.85, 0.95)$	≥ 0.95
GLS 模型参数	δ, α	γ	λ, β

4 固定沥青混合料 GLS 模型参数

根据表 2 得到的 GLS 模型各材料参数敏感性的结果,通过以下步骤固定 GLS 模型的部分参数:① 分别固定具有弱敏感度的参数 λ 和 β ; ② 当参数 λ 和 β 选用已固定值时,尝试固定具有中敏感度的参数 γ ; ③ 建立包含不同数量的固定参数组合,根据实验数据来分析和验证不同组合的合理性。

4.1 固定材料参数的方法

创建一种获得 GLS 模型材料参数固定值研究 (fixed parameter research, FPR) 方法。以沥青混合料材料参数 λ 为例,说明 FPR 方法的分析过程。

1) 材料参数 λ 在表 1 中范围为 $1.5 \sim 2.0$, 等距划分成 100 份得到 $\lambda(m)$ ($m=1,2,3,\dots,101$)。选用 4 种位移因子 $S(\omega)$ ($\omega=1,2,3,4$) 和 65 组沥青混合料的动态模量实验数据 $D(n)$ ($n=1,2,3,\dots,65$)。

2) 选取某一个 $\lambda(m)$ 值作为参数 λ 的临时固

定值,其他 4 个材料参数采用表 1 中的拟合范围。采用第 ω 种位移因子对第 n 组沥青混合料动态模量实验数据进行动态模量主曲线拟合,得到的拟合优度记为 $R^2(m,\omega,n)$ 。例如,当 $\lambda(1)=1.5$ 时,采用位移因子 WLF 和第 1 组沥青混合料的实验数据,得到拟合优度 $R^2(1,1,1)$ 。

需要注意,当固定另一材料参数时,除该参数外的其他 4 个材料参数可能部分已被固定。例如,选取某一个 $\gamma(m)$ 值作为参数 γ 的临时固定值时, λ 和 β 要采用已被固定的值, δ 和 α 采用表 1 中的拟合范围。

3) 选取某个 $\lambda(m)$ 值和第 ω 种位移因子时,求取 65 组实验数据拟合优度平均值 $U(m,\omega) = [\sum_{n=1}^{65} R^2(m,\omega,n)]/65$ 。使用数据对 $[\lambda(m), U(m,\omega)]$ ($m=1,2,3,\dots,101$) 绘制出第 ω 种位移因子对应的拟合优度平均值曲线。

4) 将 4 种位移因子对应的拟合优度平均值曲线进行平均,得到标签为“mean”的曲线。若整个曲线在 y 轴上的值都接近 1,则表明该参数可固定,其固定值为与最大 y 值对应的 x 轴的值。

4.2 材料参数的固定值

采用 FPR 方法,分别获得参数 λ 和 β 的固定值为 $\lambda^{fix}=1.605, \beta^{fix}=-0.216$,如图 6 所示。

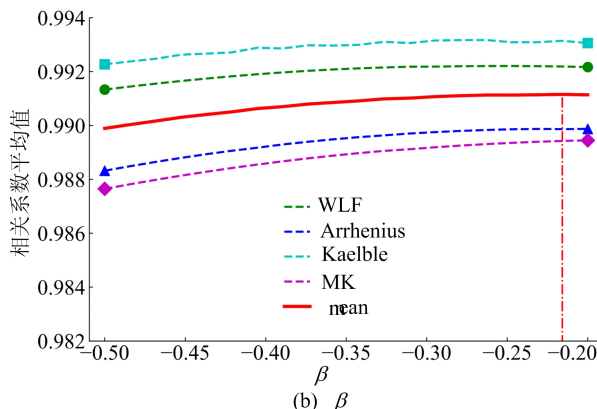
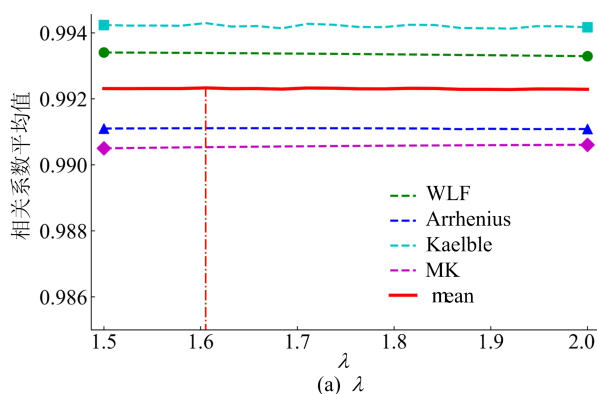


图 6 确定沥青混合料材料参数 λ 和 β 的固定值

分别固定这 2 个参数时, $\{\delta, \alpha, \lambda, \beta, \gamma\}$ 中的其他 4 个参数均采用表 1 的范围。基于 λ^{fix} 和 β^{fix} 的值, 采用 FPR 方法可以获得参数 γ 的固定值为 -0.513 , 如图 7 所示。在获取参数 γ 固定值的过程中, 参数 δ 和 α 都采用表 1 的范围。

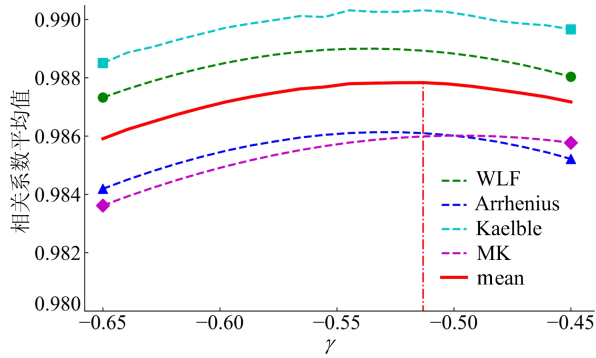


图 7 确定沥青混合料材料参数 γ 的固定值

由图 6、图 7 可知, 在确定参数 λ 、 β 和 γ 固定值过程中, 使用位移因子 Kaelble 时 65 组实验数据的动态模量的拟合优度平均值最高, 其次为位移因子 WLF, 而位移因子 Arrhenius 和 MK 的效果要差一些。4 种位移因子对应的拟合优度平均值曲线都比较平顺, 说明随着参数 λ 、 β 、 γ 的变化, 65 组实验数据的拟合效果呈现出类似的规律性。

4.3 不同材料参数固定组合的比较

根据 λ^{fix} 、 β^{fix} 和 γ^{fix} 的采用数量, 对表征沥青混合料的 GLS 模型建立 4 种材料参数固定组合 Fix- none、Fix- λ 、Fix- λ - β 和 Fix- λ - β - γ 。因为图 6a 较图 6b 的曲线整体具有更高的 R^2 值, 所以固定 1 个材料参数时选用组合 Fix- λ 。

基于 4 种材料参数固定组合, 分别采用 4 种位移因子对 65 组沥青混合料的动态模量实验数据进行动态模量主曲线的拟合, 得到的拟合优度 R^2 值不小于 0.98 的实验数据数量统计情况如图 8 所示, 各种组合下 65 组实验数据的最小 R^2 值见表 3 所列。

由图 8 和表 3 可知, 对 65 组沥青混合料的实验数据和不同的位移因子, 组合 Fix- none、Fix- λ 、Fix- λ - β 和 Fix- λ - β - γ 都能获得较高 R^2 值的动态模量主曲线。

对于组合 Fix- none、Fix- λ 、Fix- λ - β , 分别采用 4 种位移因子拟合得到 $R^2 \geq 0.98$ 的实验数据数量接近, 说明固定参数 λ 和 β 对 R^2 值的影响较小。对于各类组合, 选择位移因子的前后排序依次为 Kaelble、WLF、Arrhenius 或 MK, 这与 4.2

节的结论一致。

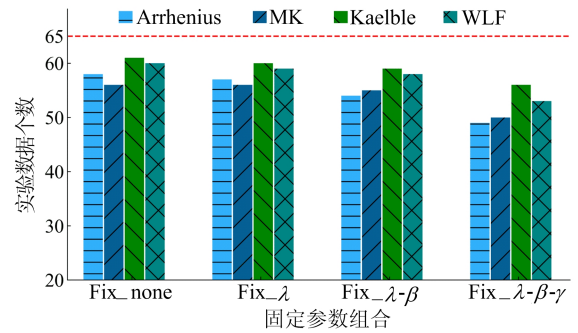


图 8 $R^2 \geq 0.98$ 的实验数据数量统计

表 3 不同固定参数组合和位移因子时的最小 R^2 值

组合	Arrhenius	MK	WLF	Kaelble
Fix- none	0.958 9	0.949 0	0.971 6	0.972 6
Fix- λ	0.958 9	0.945 7	0.971 5	0.973 0
Fix- λ - β	0.958 2	0.944 7	0.969 5	0.970 4
Fix- λ - β - γ	0.948 5	0.933 5	0.960 7	0.964 2

5 结 论

1) 位移因子 Kaelble 最适合与 GLS 模型联合使用, 而位移因子 SOP 与其他 5 种位移因子的动态模量主曲线形状有明显的差异。

2) 3 种残差函数 Fit- E' 、Fit- $E' \& E''$ 和 Fit- E_{dyn} 都可以用来拟合沥青混合料的动态模量。考虑到室内实验中动态模量的采集较为容易, 因此推荐采用 Fit- E_{dyn} 。

3) 沥青混合料采用 GLS 模型时, 弱敏感性参数为 $\{\lambda, \beta\}$, 中敏感性参数为 γ , 强敏感性参数为 $\{\delta, \alpha\}$ 。

4) 基于 65 组沥青混合料实验数据, 逐个获得 λ^{fix} 为 1.605、 β^{fix} 为 -0.216 、 γ^{fix} 为 -0.513 。根据拟合难度和精度的综合分析, 沥青混合料建议使用采取组合 Fix- λ - β 的简化 GLS 模型。

[参 考 文 献]

[1] WITCZAK M W, ANDREI D, HOUSTON W N. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures[EB/OL]. [2023-02-10]. <https://trid.trb.org/view/2004/M/703699>.

[2] ROWE G. Functional forms for master curve analysis of bituminous materials[C]//Paper Submitted to the RILEM Conference, Boston: CRC Press, 2009: 97-108.

[3] REMA A, SWAMY A K. Effect of construction methodology on uncertainty in asphalt concrete mastercurves[J]. Journal of Transportation Engineering, 2019, 145(3): 04019021.

- [4] 王昊鹏,杨军,施晓强,等.高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J].公路交通科技,2015,32(8):12-17.
- [5] TAN G, WANG W. Master curve establishment and complex modulus evaluation of SBS-modified asphalt mixture reinforced with basalt fiber based on generalized sigmoidal model[J]. Polymers (Basel), 2020, 12(7):1586.
- [6] 范志宏,唐光星,邓宏观,等.基于时温等效原理的片麻岩改性沥青混合料的动态模量主曲线研究[J].公路,2022, 67(12):41-46.
- [7] 李强,李国芬,王宏畅.受力模式对沥青混合料动态模量的影响[J].建筑材料学报,2014,17(5):816-822.
- [8] 赵延庆,薛成,黄荣华.沥青混合料抗压回弹模量与动态模量比较分析[J].武汉理工大学学报,2007,29(12):105-107,111.
- [9] FOROUGH S A. A comparative study of temperature shifting techniques for construction of relaxation modulus master curve of asphalt mixes[J]. Constr Build Mater, 2014, 53:74-82.
- [10] TAN G, WANG W. Establishment of complex modulus master curves based on generalized sigmoidal model for freeze-thaw resistance evaluation of basalt fiber-modified asphalt mixtures[J]. Polymers, 2020, 12(8):1698.
- [11] XU Q. Modelling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet-Sayegh model [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2009, 10(6):401-422.
- [12] LIU H, LUO R, LV H. Establishing continuous relaxation spectrum based on complex modulus tests to construct relaxation modulus master curves in compliance with linear viscoelastic theory [J]. Constr Build Mater, 2018, 165:372-384.
- [13] YIN D, LING X. Evaluation of thermal behavior and high-temperature performances of asphalt mixture containing fly ash cenosphere [J]. Constr Build Mater, 2020, 245:118429.
- [14] 中华人民共和国交通部.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTGE20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011:1-10.
- [15] AASHTO. Determining dynamic modulus of Hot Mix Asphalt (HMA); AASHTO T342-11 [S]. [S. l.: s. n.], 2019:1-19.
- [16] FIGUEROA A S. Effect of water conditioning for extended periods on the properties of asphalt binders[J]. Transportation Research Record, 2013, 2372(1):34-45.
- [17] HARNAEAI S R, PRAMESTI F P. Study on structural performance of asphalt concrete and hot rolled sheet through viscoelastic characterization[J]. Materials, 2020, 13(5):1133.
- [18] HOU Y, CAI Y. Dynamic characteristics of warm mix foamed asphalt mixture in seasonal frozen area[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 1:1825643.
- [19] HU J, MA T, ZHU Y, et al. A feasibility study exploring limestone in porous asphalt concrete: performance evaluation and superpave compaction characteristics[J]. Constr Build Mater, 2021, 279:122457.
- [20] JAMSHIDI A, WHITE G. Revisiting the correlation between the dynamic modulus and the flexural modulus of hot mixture asphalt [J]. Constr Build Mater, 2021, 296:123687.
- [21] JITSANGIAM P, KUMLAI S. New theoretical framework for temperature-effect integration into asphalt concrete pavement life prediction with respect to Australian pavement conditions[J]. Road Mater Pavement Design, 2020, 23(3):583-600.
- [22] LAI J, LIU J, HUANG C. The application of frequency-temperature superposition principle for back-calculation of falling weight deflectometer[J]. Applied Sciences, 2019, 10(1):132.
- [23] LI C, NING F, LI Y. Effect of carbon black on the dynamic moduli of asphalt mixtures and its master curves[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(4):918-925.
- [24] LIU Y, YOU Z. Accelerated discrete-element modeling of asphalt-based materials with the frequency-temperature superposition principle [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(5):355-365.
- [25] LIU Z, LUO S, QUAN X, et al. Laboratory evaluation of performance of porous ultra-thin overlay[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204:28-40.
- [26] LUO X, ZHANG Y. Implementation of pseudo J-integral based Paris' law for fatigue cracking in asphalt mixtures and pavements[J]. Mater Struct, 2016, 49(9):3713-3732.
- [27] SIRIN O, PAUL D K, KHAN M S. Effect of aging on viscoelastic properties of asphalt mixtures [J]. Journal of Transportation Engineering, 2019, 145(4):04019034.
- [28] SUN Y, GU B, GAO L, et al. Viscoelastic mechanical responses of HMAP under moving load[J]. Materials, 2018, 11(12):2490.
- [29] WANG H, ZHAN S, LIU G. The effects of asphalt migration on the dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13):2747.
- [30] YIN Y, HUANG W, LV J, et al. Unified construction of dynamic rheological master curve of asphalts and asphalt mixtures[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(9):1057-1067.
- [31] YOUSEFDOOST S, DENNEMEN E. Development of a national database of asphalt material performance properties in support of perpetual pavement design implementation in Australia[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188:68-87.
- [32] ZHANG Y, LUO X, DENG Y, et al. Evaluation of rutting potential of flexible pavement structures using energy-based pseudo variables[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247:118391.

(责任编辑 吴亮)