

文章编号:1673-2049(2016)04-0044-07

# 钢管混凝土徐变效应随机性灵敏度分析

赵金钢<sup>1</sup>, 赵人达<sup>2</sup>, 占玉林<sup>2,3</sup>

(1. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;  
3. 西南交通大学 陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:**针对钢管混凝土徐变的随机性,利用支持向量机回归拟合钢管混凝土徐变效应的显式函数计算随机变量的灵敏度系数,并结合蒙特卡洛法进行随机性分析;采用自适应混合粒子群法优化支持向量机相关参数的取值以提高计算效率;对2个钢管混凝土徐变模型试验构件进行徐变随机性分析,并将计算结果与蒙特卡洛法计算结果进行对比验证了该方法的可行性;同时分析了钢管混凝土徐变效应各影响因素的灵敏度。结果表明:基于支持向量机与蒙特卡洛法对钢管混凝土轴压构件徐变随机性的分析结果与蒙特卡洛法分析结果相比相对误差较小;钢管混凝土徐变效应呈现随机性,概率密度曲线近似于正态分布。

**关键词:**支持向量机;蒙特卡洛法;自适应混合粒子群法优化;钢管混凝土;徐变效应;灵敏度系数  
**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A

## Randomness Sensitivity Analysis of Creep Effect for Concrete-filled Steel Tube

ZHAO Jin-gang<sup>1</sup>, ZHAO Ren-da<sup>2</sup>, ZHAN Yu-lin<sup>2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** According to the randomness of creep for concrete-filled steel tube, the support vector machine (SVM) was used to regression fit the explicit function of creep effect for concrete-filled steel tube, and sensitivity coefficients of random variables were calculated. The randomness was analyzed combining Monte Carlo simulation (MCS). The adaptive hybrid particle swarm was used to optimize the parameters of SVM to improve the computational efficiency. Two creep model test specimens of concrete-filled steel tube were used for randomness analysis, and the calculated results were compared with the results of MCS to verify the feasibility of the method. Meanwhile, the sensitivity of various influencing factors of the creep effect for concrete-filled steel tube was analyzed. The results show that the relative error of the SVM-MCS results compared with the MCS results for creep random analysis of concrete-filled steel tube axial compression members is little. The creep effects for concrete-filled steel tube have the randomness characteristics, and the probability density curves approach to normal distribution.

收稿日期:2016-01-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51208431);中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU12CX064);  
贵州大学人才引进项目(201517)

作者简介:赵金钢(1984-),男,山东聊城人,讲师,工学博士,E-mail:zhaojingangtumu@163.com。

**Key words:** support vector machine; Monte Carlo simulation; adaptive hybrid particle swarm optimization; concrete-filled steel tube; creep effect; sensitivity coefficient

## 0 引言

当今工程设计正由确定性设计向不确定性设计发展,采用确定性参数建立的力学模型无法考虑实际工程中材料物理性质、截面尺寸和外荷载大小等影响因素的随机性对结构正常使用产生的影响。混凝土徐变效应的影响因素具有随机性,但是目前采用的规范给出的混凝土徐变计算模型均是在试验统计均值基础上建立的,存在拟合统计误差。对于中小跨径桥梁等对混凝土徐变效应不敏感的桥梁结构,忽略影响因素的随机性而进行确定性分析可以满足实际工程要求,但是对于高速铁路大跨径桥梁或高层建筑等对混凝土徐变效应敏感的结构,则不能忽略影响因素的随机性。

近年来,各国学者已就如何考虑各影响因素的随机性对混凝土徐变效应影响开展了相应研究。Madsen 等<sup>[1-2]</sup>采用点估计方法和 BP 模型对混凝土收缩徐变效应的随机性进行了分析,并提出采用拉丁超立方抽样方法计算混凝土收缩徐变随机性以降低抽样次数,提高计算效率;Oh 等<sup>[3]</sup>采用拉丁超立方抽样法对预应力混凝土箱梁的收缩徐变随机性问题进行了一系列研究;张建仁等<sup>[4]</sup>基于 Neumann 展开随机有限元法与拉丁超立方抽样法结合计算分析了大跨度预应力混凝土连续刚构桥的徐变效应随机性;潘钻峰等<sup>[5]</sup>采用拉丁超立方抽样法对苏通大桥连续刚构桥的收缩徐变效应进行了不确定性分析;张运涛等<sup>[6]</sup>采用响应面方法结合蒙特卡洛法对混凝土结构进行了徐变随机灵敏度分析;马坤等<sup>[7]</sup>采用基于响应面的蒙特卡洛法对高速铁路大跨度钢筋混凝土拱桥的时变变形进行了随机性灵敏度分析。

由于核心混凝土的徐变作用,钢管混凝土结构的徐变效应具有随机性,但是目前在该方面取得的研究成果有限。本文提出基于支持向量机-蒙特卡洛法(SVM-MCS)对钢管混凝土结构进行徐变随机性灵敏度分析,并利用文献[8]中提出的自适应混合粒子群法对支持向量机参数进行优化,通过2个算例验证该方法的可行性。

## 1 支持向量机基本原理与参数优化

### 1.1 支持向量机基本原理

对于给定的训练样本集  $T = \{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_l, y_l)\} \in (R^n \times y)^l$ , 其中  $\mathbf{x}_i \in R^n$  为  $n$  维模型样本输入,  $y_i \in R$  为模型样本输出,  $i=1, 2, \dots, l$ 。函数回归拟合问题就是在  $R^n$  上寻找函数  $f(\mathbf{x})$ , 使之对任一输入  $\mathbf{x}$  都可得到对应的  $y$  值。设  $f(\mathbf{x})$  的形式为

$$f(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{x} + b \quad (1)$$

首先定义一个不敏感损失函数  $\epsilon$ , 其可以忽略真实值与预测值之间某个范围内的误差, 该不敏感损失函数常写为

$$L(\mathbf{x}, y, f(\mathbf{x})) = \max\{0, |y - f(\mathbf{x})| - \epsilon\} \quad (2)$$

另外, 引入松弛因子  $\xi_i$ ,  $\xi_i^*$  和惩罚参数  $C$ , 松弛因子用来度量训练样本超出  $\epsilon$  不敏感区的程度, 惩罚参数  $C$  表示对超出  $\epsilon$  的样本的惩罚, 则最优化问题可以表示为

$$\min[R(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\xi}^*)] = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\omega} + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \quad (3)$$

s. t.

$$\left. \begin{aligned} f(\mathbf{x}_i) - y_i &\leq \xi_i^* + \epsilon \\ f(\mathbf{x}_i) - y_i &\leq \xi_i + \epsilon \\ \xi_i^* &\geq 0 \\ \xi_i &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

采用 Lagrange 函数得到上述优化问题的对偶形式为

$$\min\left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) - \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i + \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) \epsilon\right] \quad (5)$$

s. t.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) &= 0 \\ 0 &\leq \alpha_i \\ \alpha_i^* &\leq C \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

求解式(5), (6)可得到 Lagrange 乘子  $\alpha_i$  和  $\alpha_i^*$ , 其中只有一小部分不为 0, 它们对应的样本即为支持向量机, 可得到支持向量机回归函数为

$$\left. \begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b \\ b &= y_i - \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) + \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

通过非线性变换  $\mathbf{x} \rightarrow \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{x})$  将数据映射到一个高维特征空间, 再在该高维特征空间进行线性回归。在高维空间中点积运算可由满足 Mercer 条件的核

函数  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \langle \Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}_j) \rangle$  代替, 这种点积运算可使用原空间中的函数, 甚至不需要知道变换  $\Phi(\mathbf{x})$  的形式, 则式(5), (6)的对偶优化问题变为

$$\min \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) K(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) - \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) y_i + \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) \varepsilon \right] \quad (8)$$

s. t.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) &= 0 \\ 0 &\leq \alpha_i \\ \alpha_i^* &\leq C \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

相应的支持向量机回归函数为

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + b \quad (10)$$

当前常用的核函数主要有 3 种:

(1) 多项式型

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = (\langle \mathbf{x} \cdot \mathbf{x}_i \rangle + 1)^q$$

(2) RBF 型

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

(3) S 型

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \tanh(v \langle \mathbf{x} \cdot \mathbf{x}_i \rangle + c).$$

## 1.2 支持向量机参数优化

本文采用具有良好长期预测能力的 RBF 核函数构造支持向量机, 由第 1.1 节可知不敏感参数  $\varepsilon$ 、惩罚因子  $C$  和核函数参数  $\sigma$  的取值对支持向量机的拟合精度有直接影响, 在回归计算时需要指定一个常用的正数作为不敏感参数  $\varepsilon$ , 但是  $C$  和  $\sigma$  的值还难以用理论的方法确定。本文采用文献[8]中提出的自适应混合粒子群法优化  $C$  和  $\sigma$  的取值。采用能直接反映支持向量机回归性能的均方根误差作为自适应混合粒子群法优化的适应度函数。均方根误差  $m_{se}$  的计算公式为

$$m_{se} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (11)$$

式中:  $n$  为样本数量;  $\hat{y}$  为第  $i$  个样本的预测值。

## 2 混凝土徐变的随机性

根据 Bazant 等<sup>[2]</sup>提出的建议, 混凝土长期荷载作用下徐变的随机发展方程可以表示为

$$\varepsilon(t) = [\alpha_1 J(t, t_0)] \sigma(t_0) + \sum [\alpha_1 J(t, t_i)] \Delta \sigma(t_i) \quad (12)$$

式中:  $\alpha_1$  为与混凝土徐变模型相关的模型不确定性

变量,  $\alpha_1$  服从均值为 1.0、变异系数为 0.35 的正态分布<sup>[9]</sup>;  $J(t, t_0)$  为轴向单位应力作用下从加载龄期  $t_0$  到计算龄期  $t$  时刻混凝土结构总应变, 即徐变度。

欧洲规范 CEB-FIP 1990 徐变模型中混凝土徐变度计算公式为

$$J(t, t_0) = 1/E_{28} + \bar{\varphi}(t, t_0)/E_{28} \quad (13)$$

式中:  $\bar{\varphi}(t, t_0)$  为广义徐变系数;  $E_{28}$  为 28 d 龄期时混凝土的弹性模量。

由于外包钢管的密闭作用, 核心混凝土徐变以基本徐变为主。因此, 在计算钢管混凝土结构徐变时可取环境相对湿度为 100%, 而不考虑环境相对湿度的随机性。根据 CEB-FIP 1990 徐变模型, 取混凝土抗压强度平均值  $f_{cm}$  为随机变量, 其不确定性系数  $\alpha_2$  服从均值为 1.0、变异系数为 0.1 的正态分布。

实际工程中混凝土弹性模量具有随机性并且与混凝土的抗压强度之间存在相关性。根据文献[10]的研究结果, 混凝土弹性模量不确定性系数  $\alpha_3$  服从均值为 1.0、变异系数为 0.2 的正态分布。28 d 龄期时混凝土弹性模量与抗压强度  $f_{ck}$  之间的计算关系如式(14)所示, 加载龄期  $t_0$  时混凝土弹性模量  $E_c(t_0)$  如式(15)所示

$$E_{28} = \alpha_3 \times 2.15 \times 10^4 (f_{ck}/10)^{1/3} \quad (14)$$

$$E_c(t_0) = E_{28} \sqrt{\exp[s(1 - \sqrt{\frac{28}{t_0}})]} \quad (15)$$

式中:  $s$  为与水泥种类有关的常数, 快干高强水泥  $s=0.20$ , 快干普通水泥  $s=0.25$ , 慢干水泥  $s=0.30$ 。

将式(14), (15)代入广义徐变系数计算公式中可得

$$\bar{\varphi}(t, t_0) = \varphi(t, t_0, \alpha_2 f_{cm}) + 1/$$

$$\sqrt{\exp[s(1 - \sqrt{\frac{28}{t_0}})]} - 1 = \bar{\varphi}(t, t_0, \alpha_2 f_{cm}) \quad (16)$$

混凝土徐变度可以表示为

$$J(t, t_0) = 1/E_{28} + \bar{\varphi}(t, t_0)/E_{28} = 1/[\alpha_3 E_{28} (\alpha_2 f_{cm})] + \bar{\varphi}(t, t_0, \alpha_2 f_{cm})/[\alpha_3 E_{28} (\alpha_2 f_{cm})] \quad (17)$$

将式(17)代入式(12)可得长期荷载作用下混凝土徐变的随机发展方程为

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) \alpha_1 \frac{1 + \bar{\varphi}(t, t_0, \alpha_2 f_{cm})}{\alpha_3 E_{c28} (\alpha_2 f_{cm})} + \sum \Delta \sigma(t_i) \alpha_1 \frac{1 + \bar{\varphi}(t, t_i, \alpha_2 f_{cm})}{\alpha_3 E_{c28} (\alpha_2 f_{cm})} \quad (18)$$

式中:  $E_{c28}$  为混凝土加载龄期为 28 d 时的弹性模量。

由文献[11]可知, 钢管混凝土徐变与核心混凝土的自由徐变成正比, 并且比例系数仅与钢管和核

心混凝土的弹性模量、截面面积有关。因此,本文取钢管的弹性模量和截面面积作为随机变量。根据文献[12]的研究结果,钢管弹性模量不确定性系数 $\alpha_1$ 服从均值为 1.0、变异系数为 0.06 的正态分布。由于钢管混凝土截面面积的精度主要取决于钢管加工时的精度,因此钢管和核心混凝土截面的几何统计参数可统一按钢管结构取用。

### 3 基于支持向量机与蒙特卡洛法的随机性灵敏度分析方法

#### 3.1 抽样策略

本文主要研究钢管混凝土结构的徐变效应在大概率区间的随机分布信息,因此应使抽取的样本点较多地包含随机变量的信息,根据文献[13]采用如下方法抽取随机变量:当随机变量个数少于 6 个时采用中心复合设计法(CCD 法);当随机变量个数大于等于 6 个时,采用 Bucher 设计法。三维抽样方式示意如图 1 所示。假设某结构有  $n$  个随机变量,即  $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ ,以随机变量的均值向量  $\boldsymbol{\mu}=(\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_n)$  作为抽样中心点,并将抽样中心点以外的抽样点偏离中心点  $\pm k\sigma_i$  ( $\sigma_i$  为第  $i$  个变量的标准差,  $i=1, 2, \cdots, n$ ) 的距离。由于本文主要研究钢管混凝土结构徐变效应在大概率区间内的随机分布信息,并且随机变量不能取为负值,因此取  $k=2.5$ ,此时  $\mu \pm k\sigma$  分别对应 99.38% 分位点和 0.62% 分位点,则随机变量取值落在以均值  $\mu$  为中心,以  $2.5\sigma$  为半径的区间内的概率为 98.76%,可以保证抽取的样本点较多地包含随机变量的信息。

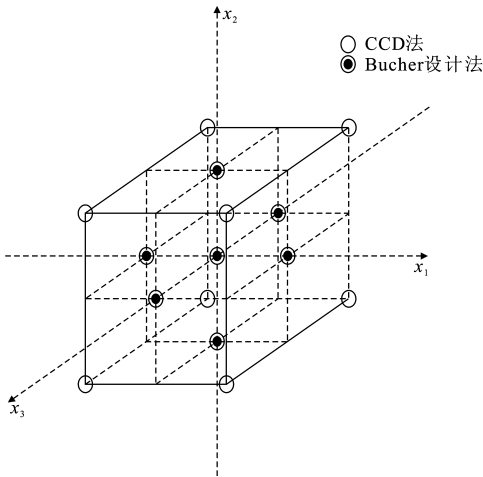


图 1 三维抽样方式示意

Fig. 1 Schematic of 3D Sampling Method

#### 3.2 结构灵敏度系数计算

灵敏度分析是研究各随机变量对结构响应贡献

程度的有效方法。利用支持向量机回归拟合的结构响应显式函数可以方便地进行灵敏度分析,灵敏度系数  $S_i$  计算公式如下

$$S_i = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \Big|_{x_i = \mu_{x_i}} / \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial f(x)}{\partial x_j} \sigma_{x_j} \Big|_{x_j = \mu_{x_j}} \right)^2} \quad (19)$$

式中:  $\mu_{x_j}$  为第  $j$  个随机变量的均值;  $\sigma_{x_j}$  为第  $j$  个随机变量的均方差。

通过在灵敏度系数中引入随机变量的均方差  $\sigma_{x_j}$ ,将灵敏度系数变为一个量纲一的量,并且可以考虑随机变量的离散性对结构响应的贡献程度,具有明确的概率意义。

#### 3.3 结构随机性灵敏度分析步骤

根据第 3.1 节的抽样策略对随机变量抽取样本点  $X_i$ ,利用有限元软件 ANSYS 建立钢管混凝土结构双单元共节点有限元模型,并采用文献[11]中提出的等效温度荷载法结合 CEB90 徐变模型计算各样本点对应的钢管混凝土徐变效应  $Y_i$ ,将样本点  $X_i$  和徐变效应  $Y_i$  作为 SVM 训练的样本对  $(X_i, Y_i)$  进行数据归一化处理。采用自适应混合粒子群法对惩罚因子  $C$  和核函数参数  $\sigma$  进行训练优化,并判断是否满足终止条件,不满足则继续循环直至指定次数。将训练成功的 SVM 结果作为徐变效应的显式函数,根据式(19)计算各随机变量的灵敏度系数,同时对随机变量抽取数量为  $N$  的输入样本,结合 MCS 对结构响应进行随机性分析,计算流程见图 2。

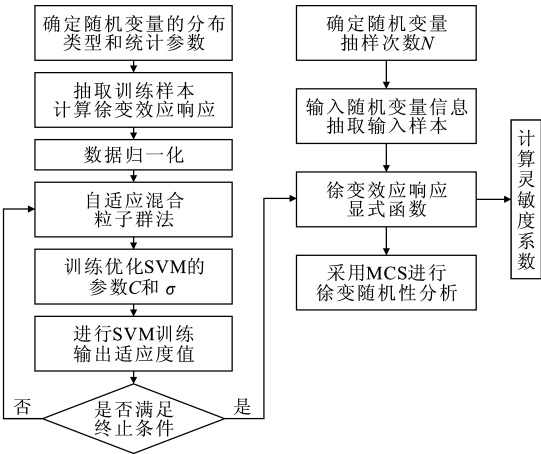


图 2 随机性灵敏度分析流程

Fig. 2 Stochastic Sensitivity Analysis Flow Chart

### 4 算例分析

为验证 SVM-MCS 应用在钢管混凝土结构徐变随机性灵敏度分析中的可行性和合理性,分别对 2 个轴压钢管混凝土构件模型徐变试验进行随机性

灵敏度分析,并与 MCS 计算结果进行对比验证。采用 MCS 进行随机性分析时,对各个随机变量在  $(0,+\infty)$  范围内随机抽取 10 000 个数据进行计算。

4.1 算例 1

文献[14]采用  $\phi 199\times 1.5$ 、高度为 600 mm 的无缝钢管开展了钢管混凝土徐变试验,加载龄期为 18 d,长期荷载持荷时间为 132 d,轴压荷载为 350 kN。混凝土抗压强度平均值  $f_{cm}$  为 45.2 MPa,钢管弹性模量  $E_s$  取为  $2.0\times 10^5$  MPa,混凝土弹性模量根据式(14)计算。在进行钢管混凝土徐变随机性灵敏度分析时,除考虑第 2 节中列出的随机变量外,还考虑了轴压荷载的随机性,引入轴压荷载不确定性系数  $\alpha_5$ ,假定其服从均值为 1.0、变异系数为 0.1 的正态分布;钢管截面尺寸的随机性只考虑沿钢管半径方向壁厚的变异,引入钢管壁厚不确定性系数  $\alpha_6$ ,根据文献[15]的统计结果, $\alpha_6$  服从均值为 1.0、变异系数为 0.022 的正态分布。本文分别采用 MCS 和 SVM-MCS 进行钢管混凝土徐变随机性分析,并将计算结果拟合的概率密度曲线进行对比,验证 SVM-MCS 的可行性,限于篇幅仅列出了第 80 d 和第 132 d 的对比结果,如图 3 所示。徐变概率密度曲线如图 4 所示,各随机变量的灵敏度系数计算结果如图 5 所示。

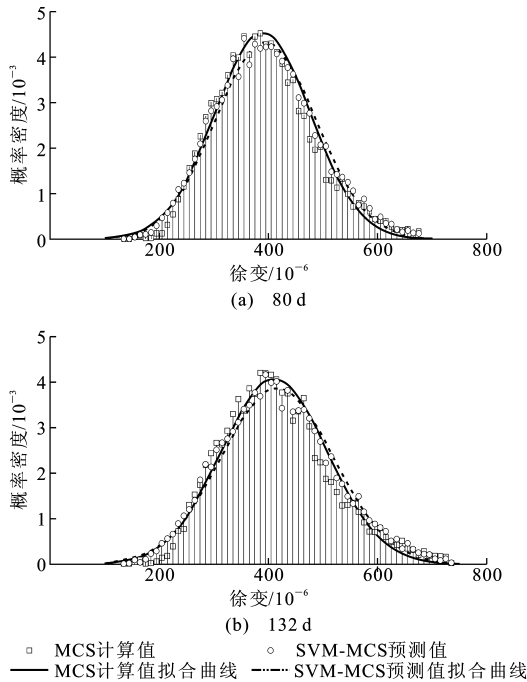


图 3 算例 1 概率密度拟合曲线

Fig. 3 Probability Density Fitting Curves of Example 1

由图 3 可知,SVM-MCS 对钢管混凝土徐变效应随机性预测值与 MCS 计算值接近,相对误差较

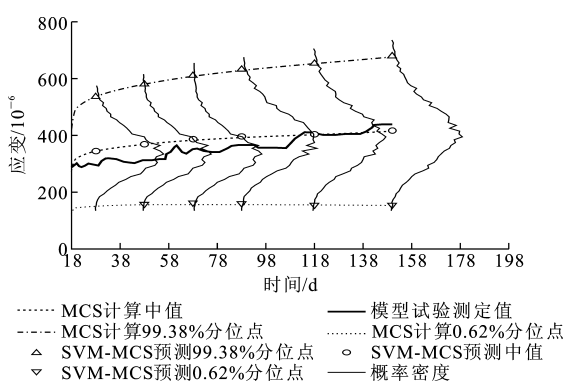


图 4 算例 1 徐变应变概率密度曲线

Fig. 4 Probability Density Curves of Creep Strain of Example 1

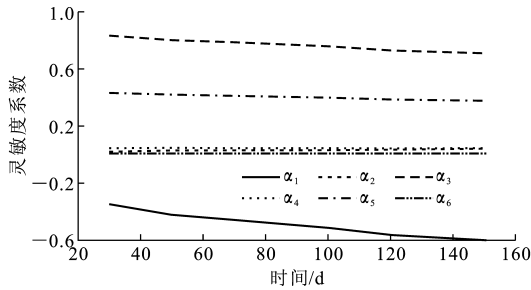


图 5 算例 1 灵敏度系数

Fig. 5 Sensitivity Coefficients of Example 1

小,表明 SVM-MCS 可以应用在钢管混凝土徐变效应随机性分析中。由图 4 可知,考虑了计算参数的随机性之后,钢管混凝土徐变应变呈现随机性,概率密度函数曲线近似于正态分布,SVM-MCS 预测中值、99.38%分位点和 0.62%分位点与 MCS 计算结果分位点吻合良好,但 SVM-MCS 预测中值、MCS 计算中值与钢管混凝土构件模型徐变试验测定值之间存在差距。由图 5 可知,钢管混凝土徐变效应对不确定性系数  $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5$  较为敏感,并且随着时间的变化,不确定性系数  $\alpha_1$  的敏感性不断增加,而不确定性系数  $\alpha_3, \alpha_5$  的敏感性逐渐降低。

4.2 算例 2

对文献[16]中的 R8 号矩形钢管混凝土试件进行徐变随机性灵敏度分析,R8 模型为采用长为 120 mm、宽为 90 mm、壁厚为 2.93 mm、高为 600 mm 的矩形钢管制作的钢管混凝土试件,加载龄期为 28 d,长期荷载持荷时间为 180 d,轴压荷载为 424 kN。内填混凝土的抗压强度平均值  $f_{cm}$  为 27.6 MPa,钢管弹性模量  $E_s$  为  $1.95\times 10^5$  MPa,混凝土弹性模量根据式(14)计算。除了考虑前文列出的随机变量外,本文还引入矩形钢管截面高度不确定性系数  $\alpha_7$  和壁厚不确定性系数  $\alpha_8$ ,根据文献[15]的统计结

果,  $\alpha_7$  服从均值为 1.0、变异系数为 0.011 的正态分布,  $\alpha_8$  服从均值为 1.0、变异系数为 0.022 的正态分布。MCS 和 SVM-MCS 计算结果拟合的概率密度曲线对比如图 6 所示,限于篇幅仅列出了第 100 d 和第 180 d 的对比结果。徐变概率密度曲线如图 7 所示,各随机变量的灵敏度计算结果如图 8 所示。

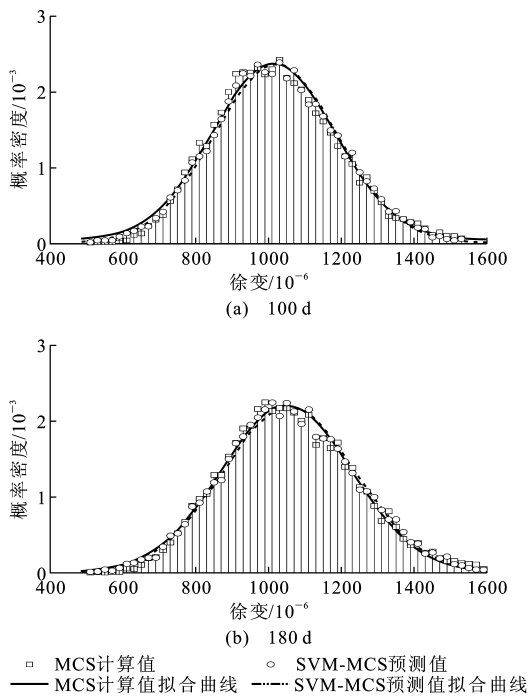


图 6 算例 2 概率密度拟合曲线

Fig. 6 Probability Density Fitting Curves of Example 2

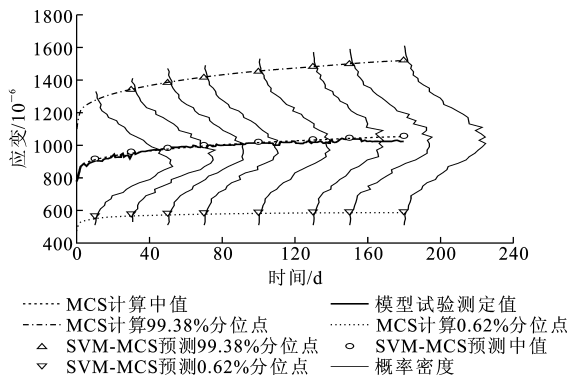


图 7 算例 2 徐变应变概率密度曲线

Fig. 7 Probability Density Curves of Creep Strain of Example 2

由图 6 可知, SVM-MCS 对钢管混凝土徐变效应随机性预测值与 MCS 计算值接近, 相对误差较小, 表明 SVM-MCS 可以应用在钢管混凝土徐变效应随机性分析中。由图 7 可知, 考虑了计算参数的随机性之后, 钢管混凝土徐变应变呈现随机性, 概率密度函数曲线近似于正态分布, SVM-MCS 预测中值、99.38%分位点和 0.62%分位点与 MCS 计算结

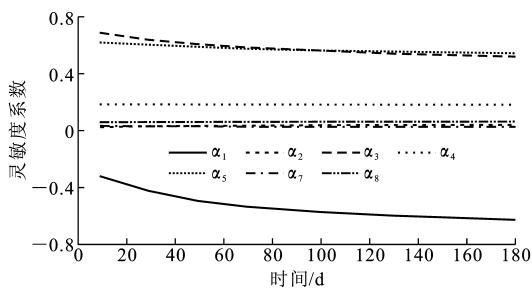


图 8 算例 2 灵敏度系数

Fig. 8 Sensitivity Coefficients of Example 2

果分位点吻合良好, 但 SVM-MCS 预测中值、MCS 计算中值与钢管混凝土构件模型徐变试验测定值之间存在差距。由图 8 可知, 钢管混凝土徐变效应对不确定性系数  $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5$  较为敏感, 并且随着时间的变化, 不确定性系数  $\alpha_1$  的敏感性不断增加, 而不确定性系数  $\alpha_3, \alpha_5$  的敏感性逐渐降低。

5 结 语

(1) 本文采用支持向量机回归拟合钢管混凝土徐变效应显式函数, 并与蒙特卡洛法结合进行徐变随机性分析, 提高了计算效率。

(2) 采用 SVM-MCS 对 2 个钢管混凝土轴压徐变试验模型进行徐变随机性分析, 并将分析结果与 MCS 计算结果进行对比, 相对误差较小, 表明 SVM-MCS 可以应用在钢管混凝土徐变效应随机性分析中。

(3) 考虑各影响参数的随机性之后, 钢管混凝土徐变效应概率密度函数曲线近似于正态分布, 并且 SVM-MCS 预测中值、99.38%分位点和 0.62%分位点与 MCS 计算结果分位点吻合良好, 但是 SVM-MCS 预测中值、MCS 计算中值与钢管混凝土构件模型徐变试验测定值之间存在差距, 钢管混凝土徐变效应随机性分析可以给出具有概率保证意义的分析结果, 因此有必要对钢管混凝土结构徐变效应进行随机性分析。

(4) 钢管混凝土徐变效应对不确定性系数  $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5$  较为敏感, 并且随着时间的变化, 不确定性系数  $\alpha_1$  的敏感性不断增加, 而不确定性系数  $\alpha_3, \alpha_5$  的敏感性逐渐降低。

参考文献:

References:

[1] MADSEN H O, BAZANT Z P. Uncertainty Analysis of Creep and Shrinkage Effects in Concrete Structures [J]. ACI Materials Journal, 1983, 80(2): 116-127.

- [2] BAZANT Z P, LIU K L. Random Creep and Shrinkage in Structures: Sampling[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 115(5): 1113-1134.
- [3] OH B H, YANG I H. Sensitivity Analysis of Time-dependent Behavior in PSC Box Girder Bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(2): 171-179.
- [4] 张建仁, 汪维安, 余钱华. 高墩大跨连续刚构桥收缩徐变效应的概率分析[J]. 长沙交通学院学报, 2006, 22(2): 1-7, 28.  
ZHANG Jian-ren, WANG Wei-an, YU Qian-hua. Probabilistic Analysis of Shrinkage and Creep Effect for Continuous Rigid Frame Bridges with Longspan and High Piers[J]. Journal of Changsha Communications University, 2006, 22(2): 1-7, 28.
- [5] 潘钻峰, 吕志涛, 刘 钊, 等. 苏通大桥连续刚构收缩徐变效应的不确定性分析[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 67-73.  
PAN Zuan-feng, LU Zhi-tao, LIU Zhao, et al. Uncertainty Analysis of Creep and Shrinkage Effect in Continuous Rigid Frame of Sutong Bridge[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(9): 67-73.
- [6] 张运涛, 孟少平, 张 速. 基于响应面法的桥梁结构徐变效应分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 78-82.  
ZHANG Yun-tao, MENG Shao-ping, ZHANG Su. Creep Effect Analysis of Bridge Structure Based on Response Surface Methodology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 78-82.
- [7] 马 坤, 向天宇, 赵人达, 等. 高速铁路钢筋混凝土拱桥长期变形的随机分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 141-146.  
MA Kun, XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da, et al. Stochastic Analysis of Long-term Deformation of Reinforced Concrete Arch Bridges for High-speed Railways[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 141-146.
- [8] 赵金钢, 赵人达, 占玉林, 等. 基于支持向量机和蒙特卡洛法的结构随机灵敏度分析方法[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 195-202.  
ZHAO Jin-gang, ZHAO Ren-da, ZHAN Yu-lin, et al. Stochastic Sensitivity Analysis Method Based on Support Vector Machine and Monte Carlo[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 195-202.
- [9] BAZANT Z P, LI G H. Unbiased Statistical Comparison of Creep and Shrinkage Prediction Models[J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(6): 610-621.
- [10] LAUMET P. Reliability-based Deterioration Model for Deflection Limit State Girder Bridges[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2006.
- [11] 赵金钢, 赵人达, 占玉林. 钢管混凝土轴心受压构件徐变计算方法及徐变模型对比分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(4): 46-52.  
ZHAO Jin-gang, ZHAO Ren-da, ZHAN Yu-lin. Comparative Analysis of Creep Calculation Methods and Creep Models for Axially Compressed CFST Members[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(4): 46-52.
- [12] LIU C H. Reliability Validation of Multigirder Steel Bridges Designed by LRFD[J]. Computers & Structures, 2002, 80(32): 2515-2527.
- [13] 马 超, 吕震宙. 结构可靠性分析的支持向量机分类迭代算法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(7): 816-819.  
MA Chao, LU Zhen-zhou. Iterative Algorithm for Structure Reliability Analysis Based on Support Vector Classification Method[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(7): 816-819.
- [14] TERREY P J, BRADFORD M A, GILBERT R I. Creep and Shrinkage of Concrete in Concrete-filled Circular Steel Tubes[C]//CRUNDY P. Proceedings of the 6th International Symposium on Tubular Structures. Melbourne: Balkema A A, 1994: 293-298.
- [15] 李 昆. 基于可靠度理论的公路钢桥概率极限状态设计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
LI Kun. Research for the Steel Highway Bridge Design Method of Probability Limited Status Based on Reliability Theory[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [16] 韩林海, 杨有福, 刘 威. 长期荷载作用对矩形钢管混凝土轴心受压柱力学性能的影响研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 12-18.  
HAN Lin-hai, YANG You-fu, LIU Wei. The Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Columns with Rectangular Section Under of Long-term Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3): 12-18.