

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.017

# 基于 Kriging 模型的大跨度拱桥时变地震易损性分析

郑攀, 何沛祥

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章以桥墩钢筋锈蚀机理为基础,探究了基于氯离子环境侵蚀引起的钢筋直径及力学性能的退化规律,同时考虑地震动和结构参数的变异性,因分析计算量很大,引入 Kriging 模型和拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)法建立易损性曲线,并利用 Monte Carlo 抽样方法形成全寿命周期内的桥梁系统损伤概率曲面。运用 OpenSEES 程序引入时变效应,对某大跨度拱桥建立有限元模型。分析结果表明:Kriging 模型能够较精确地代替有限元进行分析,能够显著减小计算量;对于大跨度拱桥而言,由 Monte Carlo 抽样得到的全桥体系易损性来评价桥梁的抗震性能更加合理;在全寿命设计基准期内,随着服役时间增加,桥墩损伤概率明显增大。该研究可为类似桥梁结构全寿命抗震性能设计提供参考。

**关键词:**大跨度拱桥; Kriging 模型; 时变易损性; Monte Carlo 抽样; 体系易损性

**中图分类号:** U441.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)10-1404-08

## Time-varying seismic vulnerability analysis of long-span arch bridge based on Kriging model

ZHENG Pan, HE Peixiang

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

**Abstract:** This paper explores the degradation law of reinforcement diameter and mechanical properties caused by chloride erosion based on the corrosion mechanism of pier reinforcement and considers the variability of ground motion and structural parameters. Due to the large amount of analysis and calculation, Kriging model and Latin hypercube sampling (LHS) method are introduced to establish the vulnerability curve, and the method of Monte Carlo sampling is used to form the damage probability surface of the bridge system in the whole life cycle. OpenSEES program is used to establish finite element model for a long-span arch bridge, in which the time-varying effect is introduced. The analysis results show that Kriging model can accurately replace the finite element analysis, and can significantly reduce the calculation amount. For long-span arch bridges, it is more reasonable to evaluate the seismic performance of bridges by the vulnerability of the whole bridge system obtained by Monte Carlo sampling. During the life-cycle design reference period, the pier damage probability increases significantly with the increase of service time. The research can provide reference for the life-cycle seismic performance design of similar bridge structures.

**Key words:** long-span arch bridge; Kriging model; time-varying vulnerability; Monte Carlo sampling; system vulnerability

概率性地震易损性分析方法<sup>[1]</sup>是从概率角度定量地描述结构的抗震性能,且充分考虑外界地

震动的不确定性,采用理论分析建立其地震易损性曲线,被国内外研究者所采用。传统的抗震设

收稿日期:2023-02-23;修回日期:2023-03-14

基金项目:合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2020JSFW0263)

作者简介:郑攀(1998—),男,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

何沛祥(1965—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: hpxwt@hfut.edu.cn.

计理论忽略了结构在整个寿命周期内抗震性能退化的客观事实,从全寿命周期评价角度考虑环境侵蚀等因素或与其他荷载的耦合作用,对桥梁进行抗震设计与运维,已经成为了近年来桥梁结构抗震领域的热点问题<sup>[2]</sup>。目前结合运营阶段内的构件性能的老化来开展桥梁遭受地震灾害的损伤程度的研究并不多见。已有的一些研究也主要是以中小跨径、规则桥梁为研究对象,针对非规则的大跨径桥梁的时变地震易损性研究还较少<sup>[3]</sup>。而对于一个复杂的高维、非线性程度高的桥梁系统,尤其是对其进行考虑不确定性及全寿命周期内易损性分析时,需执行带有参数修正的程序命令建立多个理论模型,计算量极大、费时耗力。因此,有必要寻求一种代理模型以避免复杂的有限元计算,提升分析效率。Kriging 模型作为一种估计方差最小的无偏估计模型,将全局近似与局部误差最小相结合,其有效性不会受到随机误差的干扰,在处理多重非线性效应和局部响应突变问题时,具有良好的效果,该模型多次被运用于复杂问题的近似计算方面<sup>[4-5]</sup>,并取得了较好的应用效果。

## 1 相关理论介绍

### 1.1 Kriging 模型理论

Kriging 模型<sup>[6]</sup>包含回归部分和非参数部分;对于  $n$  维输入样本  $x$ ,其对应响应值所建立的模型可表示为:

$$\mathbf{y}(x) = \mathbf{f}^T(x)\boldsymbol{\beta} + \mathbf{z}(x) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{f}(x)=[f_1(x_1) \ f_2(x_2) \ \cdots \ f_n(x_k)]^T$ 为模型回归基函数向量,用来模拟全局近似; $\boldsymbol{\beta}=[\beta_1 \ \beta_2 \ \cdots \ \beta_n]$ 是待定回归系数向量; $\mathbf{z}(x)$ 为服从正态分布  $N(0, \sigma^2)$  的统计过程,模拟局部偏差,其均值为 0,方差为  $\sigma^2$ ,即有以下统计特征:

$$E[\mathbf{z}(x)] = 0, \quad \text{Var}[\mathbf{z}(x)] = \sigma^2 \quad (2)$$

$$\text{Cov}(\mathbf{z}(\mu), \mathbf{z}(\nu)) = \sigma^2 R(\theta, \mu, \nu) \quad (3)$$

其中, $R(\mu, \nu)$ 为  $\mu, \nu$  的 2 个输入样本点之间的空间变异相关函数,对模拟的精确程度起着决定性作用, $\theta$  为变异函数的参数,一般形式如下:

$$R(\mu, \nu) = \prod_{j=1}^n R_j(\mu_j - \nu_j) = \prod_{j=1}^n R_j(d_j) \quad (4)$$

其中, $R_j(d_j)$ 为所选函数中的核函数,可有指数型(EXP)、高斯型(GAUSS)、线性(LIN)等 7 种相关系数模型<sup>[7]</sup>,本文采用 GAUSS 函数,则相关函数形式如下:

$$R(\mu, \nu) = \prod_{j=1}^n \exp[-\theta_j(\mu_j - \nu_j)^2] = \prod_{j=1}^n \exp[-\theta_j d_j^2] \quad (5)$$

其中: $n$  为变异函数的维数; $\theta$  为各向异性参数; $d$  为数据之间的距离。

根据 Kriging 原理,预测值表达式为:

$$\mathbf{y}_{\text{pri}}(x) = \mathbf{c}(x)^T \mathbf{Y} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{c}(x)$ 为权系数矩阵,根据 Kriging 模型预测方差最小原则求解:

$$\mathbf{c}(x) = \mathbf{R}^{-1} \{ \mathbf{r}(x) - \mathbf{F}(\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} [\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(x) - \mathbf{f}(x)] \} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{R}$  为构造的相关矩阵。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R(x_1, x_1) & \cdots & R(x_1, x_m) \\ \vdots & & \vdots \\ R(x_m, x_1) & \cdots & R(x_m, x_m) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: $m$  为试验点总数; $\mathbf{F}$  为由试验数据点构成的系数矩阵。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1(x_1) & \cdots & f_n(x_1) \\ \vdots & & \vdots \\ f_1(x_m) & \cdots & f_n(x_m) \end{bmatrix} \quad (9)$$

预测点  $x_i$  与试验数据点之间的相关矩阵

$\mathbf{r}(x_i)$ 为:

$$\mathbf{r}(x_i) = [R(x_i, x_1) \ R(x_i, x_2) \ \cdots \ R(x_i, x_m)]^T \quad (10)$$

利用已求解的相关函数参数和模型系数,即可得到未知点  $x_i$  处的预测值:

$$\mathbf{y}_{\text{pri}}(x_i) = \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} - (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} - \mathbf{f}(x_i))^T (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Y} \quad (11)$$

式(11)为构建的唯一目标 Kriging 模型。

### 1.2 材料性能退化规律

因为桥墩的性能对全桥的地震反应起着主导作用,所以本文主要考虑桥墩。因桥墩受力主要以竖向压力为主,墩柱横向裂缝难以发展,从而相对减小了箍筋锈蚀程度,因此本文只考虑纵筋在氯离子腐蚀环境下的锈蚀;同时由于纵筋和箍筋形成的钢筋笼对墩柱的核心混凝土起到了一定的保护作用,因此本文不考虑核心混凝土的性能退化<sup>[8]</sup>。

目前,多数学者考虑多种因素的影响,建立了多种氯离子侵蚀模型来研究其在干钢筋混凝土中的扩散规律。本文参考认可度较高的 Dura-Crete<sup>[9]</sup>模型,计算钢筋腐蚀起始时间,可采取概率性方法以消除模型中众多因素的变异性所带来的影响,处理方法可参考文献<sup>[10]</sup>。

$$T_{\text{corr}} = X_1 \left\{ \frac{d_c^2}{4k_e k_t k_c D_0 t_0^n} \left[ \text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{c_{\text{cr}}}{c_{\text{cs}}} \right) \right]^2 \right\}^{1/(1-n)} \quad (12)$$

其中:  $T_{\text{corr}}$  为钢筋腐蚀起始时间;  $X_1$  为不确定系数;  $k_e$  为环境影响系数;  $k_t$  为扩散系数试验方法影响系数;  $k_c$  为养护时间影响系数;  $t_0$  为养护时间;  $D_0$  为扩散系数;  $d_c$  为保护层厚度;  $c_{\text{cs}}$  为表面氯离子浓度;  $n$  为衰减系数, 取 0.37;  $c_{\text{cr}}$  为临界氯离子浓度。

随着环境腐蚀作用的进一步深入, 材料各项力学性能逐渐退化。参考文献[11]给出的钢筋屈服应力和直径的退化公式, 具体如下:

$$f_y(t) = [1 - \beta Q(t)] f_{y0} \quad (13)$$

$$D_s(t) = D_{s0} \sqrt{1 - Q(t)} \quad (14)$$

其中:  $t$  为腐蚀起始至当前所经历的时间;  $f_y(t)$  为  $t$  时刻的钢筋屈服强度;  $f_{y0}$  为钢筋初始屈服应力;  $D_s(t)$  为  $t$  时刻的钢筋直径;  $D_{s0}$  为钢筋的初始直径;  $\beta$  为修正系数;  $Q(t)$  为腐蚀作用下钢筋损失质量相对于初始质量的百分比, 具体参数值可根据文献[11-12]确定。

由文献[13]及固体力学理论, 锈蚀钢筋的弹性模量时变表达式为:

$$E_s(t) = \sqrt[3]{\frac{1 - 1.077\eta_s(t)}{1 - \eta_s(t)}} E_{s0} \quad (15)$$

$$\eta_s(t) = 1 - \left[ \frac{D_{s0} - \int_0^{t_0} \lambda(t) dt}{D_{s0}} \right]^2 \quad (16)$$

其中:  $E_s(t)$  为  $t$  时刻钢筋弹模;  $E_{s0}$  为钢筋初始弹模;  $\eta_s(t)$  为钢筋在  $t$  时刻之后的截面损失率;  $t_0$  为钢筋的锈蚀时间;  $\lambda(t)$  为钢筋的腐蚀速率。

## 2 算例数值分析

### 2.1 算例简介

本文算例选取我国近海某 Nielsen 体系下承式钢管混凝土系杆拱桥, 跨度为 128 m, 矢跨比为 1:5。桥梁结构布置及有限元模型如图 1 所示。系梁为单箱单室预应力混凝土结构, 拱肋采用哑铃形截面, 桥梁整体布置如图 1a 所示。桥墩受环境氯离子环境腐蚀作用, 墩高 12.5 m, 桥墩的纵向配筋率为 0.85%, 支座为活动型钢支座, 恢复力模型如图 1e 所示。本文基于 OpenSEES 开源代码进行 3D 建模。桥梁上部结构在地震作用下基本处于弹性状态, 则使用线弹性单元模拟。桥墩要承受大地传导的地震力, 允许桥墩在强震作用下屈服, 故采用纤维单元模拟, 划分截面如图 2

所示。桥墩纵筋采用 HRB400 钢筋, 采用 Steel01 本构, 如图 1b 所示; 混凝土采用 C35 混凝土, 用 Kent-Scott-Park 本构模型模拟; 吊杆本构如图 1c 所示, 索力通过赋予单元初始应变的方式来实现,  $\sigma_0$  为初应力, 用 Truss 单元进行模拟。桥梁前 3 阶固有频率大小分别为 0.518、1.121、1.658, 振型以横向侧弯为主。设防烈度为 7°, 地震动峰值加速度为 0.15g。

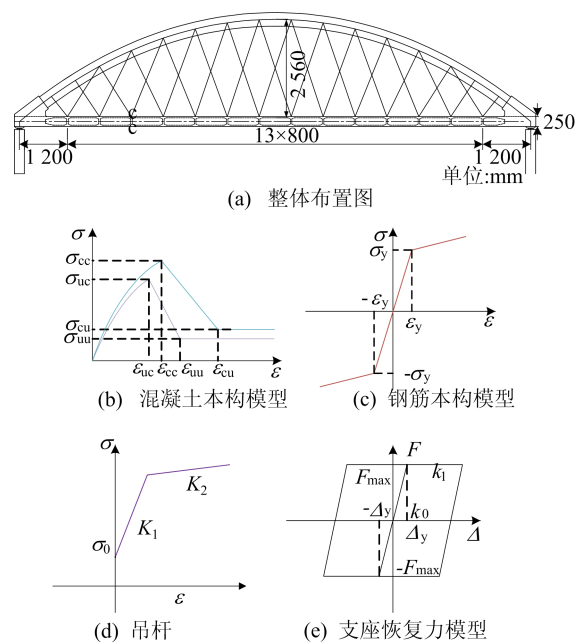


图 1 桥梁结构布置及有限元模型

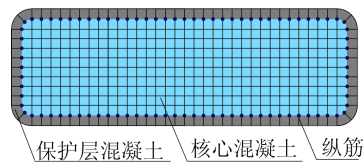


图 2 桥墩纤维截面

### 2.3 模型不确定性分析

不确定性体现在地震波的差异性和建模时众多相关参数的概率分布特征对易损性函数概率分布特性的影响。

本文采用拉丁超立方抽样 (Latin hypercube sampling, LHS) 方法来实现不确定性的传递。研究表明, 结构不确定性对于结构的动力响应特性及易损性会产生不可忽略的影响。参考文献[14-15], 本文选择系梁容重系数  $\rho$ , 水平刚度  $k$ , 通钢筋弹模  $E_s$ , 核心混凝土峰值应力  $\sigma_{\text{core}}$ , 核心混凝土峰值应变  $\epsilon_{\text{core}}$ , 普通钢筋截面直径  $D_s$  来考虑桥梁结构本身的不确定性, 各参数概率分布的确定参考文献[15], 不考虑随机变量之间的相关性。考虑的参数及分布见表 1 所列。

表 1 参数变量统计信息

随机变量	分布	特征参数	
		$\mu$	协方差/%
$\rho$	正态分布	1.04	10
$k$	正态分布	$2.2 \times 10^7$	14
$E_s$	对数正态分布	$2.1 \times 10^5$	2
$D_s$	正态分布	22	3.5
$\sigma_{core}$	对数正态分布	26.4	21
$\epsilon_{core}$	对数正态分布	2.9	20

为充分考虑地震动的随机性,本文主要考虑按峰值、震中距、频谱特性、地震动持时等原则进行选波,以充分反映地震动本身不确定性。案例桥梁所处场地类别为 II 类场地,反应谱特征周期为 0.35 s,基本地震动峰值加速度为 0.15g。根据设计反应谱从 PEER 中匹配 15 条天然地震波,地震波反应谱曲线如图 3 所示,图 3 中: Wave1~Wave15 依次为 RSN826、832、836、838、854、855、906、937、968、980、1028、1066、1755、1766、1768。

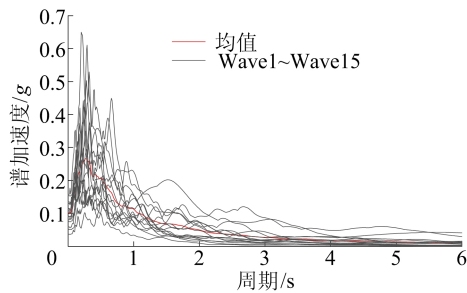


图 3 地震波反应谱

### 2.4 损伤指标划分

文献[16]将桥梁破坏过程用 4 种状态描述,即轻微、中等、损伤和完全破坏,便于计算分析,进行指标量化。对于桥墩,根据构件受力特点及参考文献,本文选取应用较为广泛的墩底截面弯曲曲率作为其损伤指标,同时,考虑氯离子侵蚀效应对其抗弯能力方面的影响,利用 Xtract 对各个时间节点的桥墩钢筋混凝土截面进行分析,可得到 4 级损伤状态下的曲率分析数据,见表 2 所列。

表 2 桥墩损伤级别及损伤指标

服役时间/a	损伤状态/ $10^{-3}$			
	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
0	0.926	1.423	2.852	6.565
25	0.926	1.423	2.85	6.565
50	0.926	1.421	2.844	6.125
75	0.926	1.418	2.838	5.736
100	0.922	1.411	2.83	4.912

对于支座,案例桥梁采用 TJQZ 系列球型钢支座,竖向承载力为 30 000 kN,根据桥梁设计文件和有关规范<sup>[17]</sup>得知该桥单向和双向活动支座最大纵向允许位移值为  $\pm 100$  mm,不考虑支座能力时变特性,其最终损伤状态与损伤指标对应关系见表 3 所列。

表 3 支座损伤级别及损伤指标

损伤状态	位移/mm
轻微破坏	$37 < \mu \leq 50$
中等破坏	$50 < \mu \leq 80$
严重破坏	$80 < \mu \leq 100$
完全破坏	$100 < \mu$

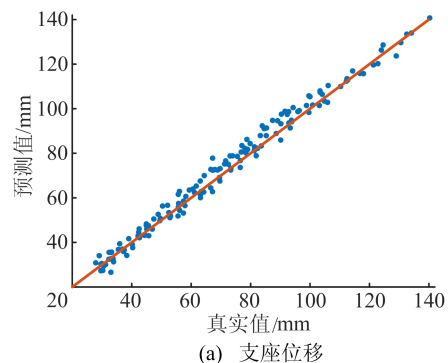
## 3 基于 Kriging 模型的易损性曲线

### 3.1 Kriging 模型的建立

为减小离散且突出地震动的不确定性,同时考虑地震动强度(intensity measures, IM)参数的有效性,本文选用峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)、 $Sa(T_1)$ 作为地震动指标,将 15 条天然地震波 PGA 分别调幅成 10 个水平,即 0.1g~1.0g(增量 0.1g);将上述结构参数在其 $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ 范围内采用 LHS 均匀抽样 150 次;与地震动进行随机配对即可获得 150 组桥梁-地震动输入样本,代入有限元模型进行计算,得到目标地震需求,用于 Kriging 模型的构建,构建前需将输入样本组数据 Z-Score 标准化。

针对算例,采用 GAUSS 空间相关函数,且考虑各向异性,对支座位移和桥墩墩底曲率的预测结果与真实结果进行对比,如图 4 所示。

由图 4 可知,离散控制在一个合理可接受范围内,真实值与预测值吻合度较高,表明建立的 Kriging 模型的预测能力良好。



(a) 支座位移

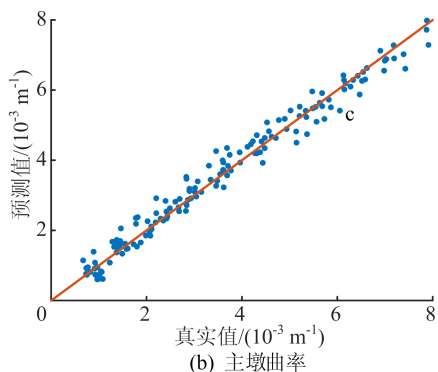


图 4 构件响应预测值与真实值对比

3.2 易损性曲线建立

基于 PSDA(probabilistic seismic demand analysis)的线性拟合法通过选取一定数量的地震波对桥梁结构进行非线性时程分析,得到结构的地震工程需求参数(engineering demand parameter,EDP)与 IM 之间的离散点。参考文献[18]给出的需求与地震动强度之间的统计关系:

$$D = aI_{IM}^b \tag{17}$$

将式(17)进行对数转换得到如下回归函数,即

$$\ln D = b \ln I_{IM} + \ln a \tag{18}$$

其中,  $a, b$  为相应的估计参数,可统计回归得到。

对应该状态的失效概率为:

$$P_f = P(D_1 \geq L_s | I_{IM}) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln L_s - \ln D}{\beta}\right) \tag{19}$$

其中:  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布;  $D_1$  为参考的结构破坏指数;  $L_s$  为各等级的极限状态;  $\beta$  为 EDP 与 IM 之间回归分析所得的标准差。

对每级 IM 下的桥梁参数不确定性和地震动不确定性参数进行抽样 2 000 组,用训练好的 Kriging 代理模型预测构件地震需求,将 EDP 与 IM 在对数坐标系下进行线性回归分析。有限元法(finite element method, FEM)模型和 Kriging 模型得到的桥墩曲率和支座位移的线性回归方程见表 4 所列。

将回归结果和抗震能力代入式(19),得到相应的损伤概率值。限于篇幅及方便比较,将由 Kriging 模型和有限元非线性时程分析这 2 种方法得到的损伤概率曲线如图 5 所示。

表 4 构件地震需求与 PGA 线性回归方程

构件需求	线性回归方程	
	FEM 模型	Kriging 模型
支座位移	$\ln D = 0.582 \ln A_{PGA} - 4.581$	$\ln D = 0.58 \ln A_{PGA} - 4.55$
主墩墩底曲率	$\ln D = 1.01 \ln A_{PGA} - 5.074$	$\ln D = 1.015 \ln A_{PGA} - 5.141$

对比可知,采用 Kriging 模型计算出的构件损伤概率比采用有限元法计算出的值略大,其本质原因是大部分需求预测值大于真实值,趋势与图 4 一致。支座的轻微破坏与中等破坏状态下,2 种方法得到的易损性曲线差值较小,最大值分别为 3.1%、5.3%,而严重破坏和完全破坏情况下,其差值较大。

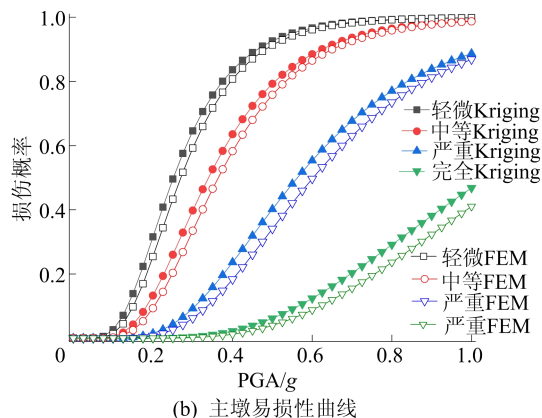
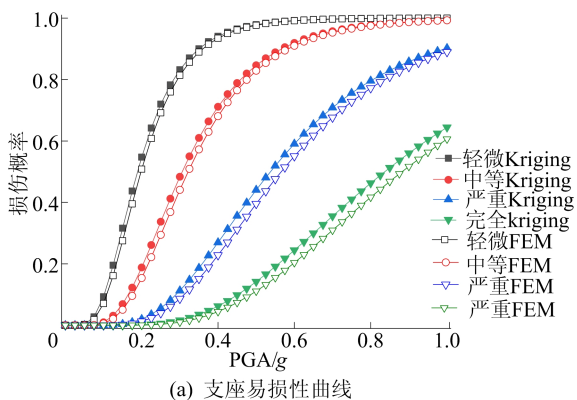


图 5 2 种方法易损性曲线对比



由图 5 可知,最大值分别达到了 6.8%、7.3%;主墩的轻微破坏与中等破坏状态下,2 种方法得到的易损性曲线差值最大值分别为 5.6%、6.4%,而严重破坏和完全破坏情况下,最大值分别达到了 8.3%、9.5%。

整体而言,预测误差均在可接受范围内。在

后续研究体系时变地震易损性中,可进一步引入 Kriging 模型。

#### 4 时变体系易损性分析

文献[15]研究表明,以构件易损性代替桥梁体系的易损性会高估其抗震能力,对于结构的前期设计及后期运维而言,通常最关心的还是结构体系的易损性。本节主要从全寿命周期角度,引入时变效应,建立各个主要时间节点的理论 Kriging 模型,对结构整体进行时变地震易损性的相关分析。

##### 4.1 Monte Carlo 法简介

为建立较准确合理评估桥梁地震易损性情况,文献[19]提出一种以构件概率地震需求模型为基础,并结合蒙特卡洛抽样技术的系统易损性曲线建立方法。

该方法的核心思想为:首先假设各个构件的联合概率分布服从多元正态分布,再根据各个构件的概率地震需求模型(即多元联合概率分布的边缘分布)和各个构件之间的相关系数矩阵建立构件之间的联合概率分布函数。

该方法采用随机向量  $\mathbf{D}=(D_1, D_2, \dots, D_n)$  表示  $n$  个桥梁构件的地震需求,则  $\mathbf{D}$  的边缘分布也都服从对数正态分布,经过对数转换:  $Y_i = \ln D_i$ ,  $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$  服从正态分布,假定联合概率分布也服从正态分布,再确定均值向量  $\boldsymbol{\mu}_Y$  和相应的相关系数矩阵  $\boldsymbol{\rho}_{ij}$ ,即可建立多元联合分布函数。

$$\rho_{ij} = \frac{\text{Cov}(\ln D_i, \ln D_j)}{\sqrt{D(\ln D_i)D(\ln D_j)}} \quad (20)$$

其中:  $\text{Cov}(\ln D_i, \ln D_j)$  为协方差;  $D(\ln D_i)$  表示  $\ln D_i$  的方差。

在 Monte Carlo 抽样的  $N$  个样本点中,将其每个样本点中的桥梁各构件抗震能力  $C$  和地震需求  $D$  进行比较。

$$I_0 = \begin{cases} 0, & [D_1, D_2, \dots, D_n] < [C_1(S_i), \\ & C_2(S_i), \dots, C_n(S_i)]; \\ 1, & [D_1, D_2, \dots, D_n] \geq [C_1(S_i), \\ & C_2(S_i), \dots, C_n(S_i)] \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $S_i$  为指定的第  $i$  个损伤状态。

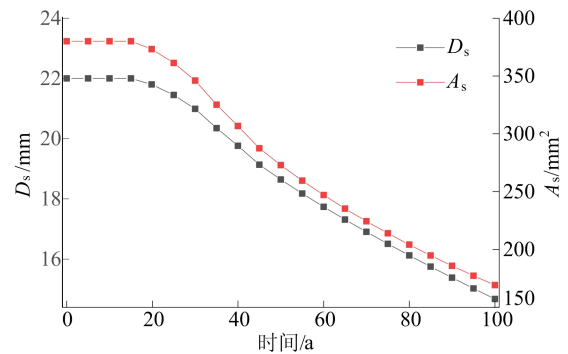
当所有构件的地震需求均小于其抗震能力时,指标函数等于 0,否则指标函数等于 1,系统失效概率为:

$$P_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^N I_0 / N \quad (22)$$

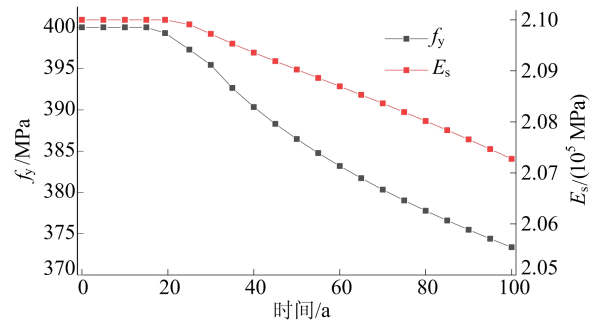
##### 4.2 材料性能时变规律

结合桥梁自身参数及式(2)~(4),可以建立关于钢筋面积等特性随服役时间的时变规律,如图 6 所示。

基于图 6,通过修正桥梁有限元模型中材料本构,可引入时变效应。



(a) 钢筋直径和面积时变规律



(b) 钢筋强度和弹模时变规律

图 6 钢筋特性的时变曲线

##### 4.3 系统时变易损性曲面

时变造成的损伤概率的变化体现在式(19)中的能力与需求的改变。基于前述分析,为方便评价桥梁体系在全寿命期内的地震易损性变化,采用 Monte Carlo 方法分别建立桥梁系统 4 级损伤状态下损伤概率曲面如图 7 所示。

从图 7 可以看出,桥梁体系的损伤概率随着时间的推移逐渐增加,但在第 1 个时间节点并未发生显著变化,这是由于混凝土保护层延迟了内部钢筋材料的腐蚀。服役 100 a 周期与初始服役时相比,桥梁系统发生轻微损伤、中等损伤、严重损伤及完全破坏的超越概率最大增量分别达到 55.4%、32.1%、23.7%、18.2%;服役中期,在设计地震动(0.15g)作用下,体系发生轻微破坏与中等破坏超越概率分别达到 40.5%、14.6%;相比于成桥时地震易损性,分别增长了 29.5%、17.7%;在罕遇地震动(0.4g)作用下,体系发生

轻微破坏的超越概率为 95.3%、75.8%，相比于成桥时地震易损性，分别增长了 25.9%、15.4%。综上所述可知，时变效应对桥梁整个系统地

震易损性的影响是不可忽视的，研究环境侵蚀背景下的地震作用对结构的损伤程度更具有相关实际工程意义。

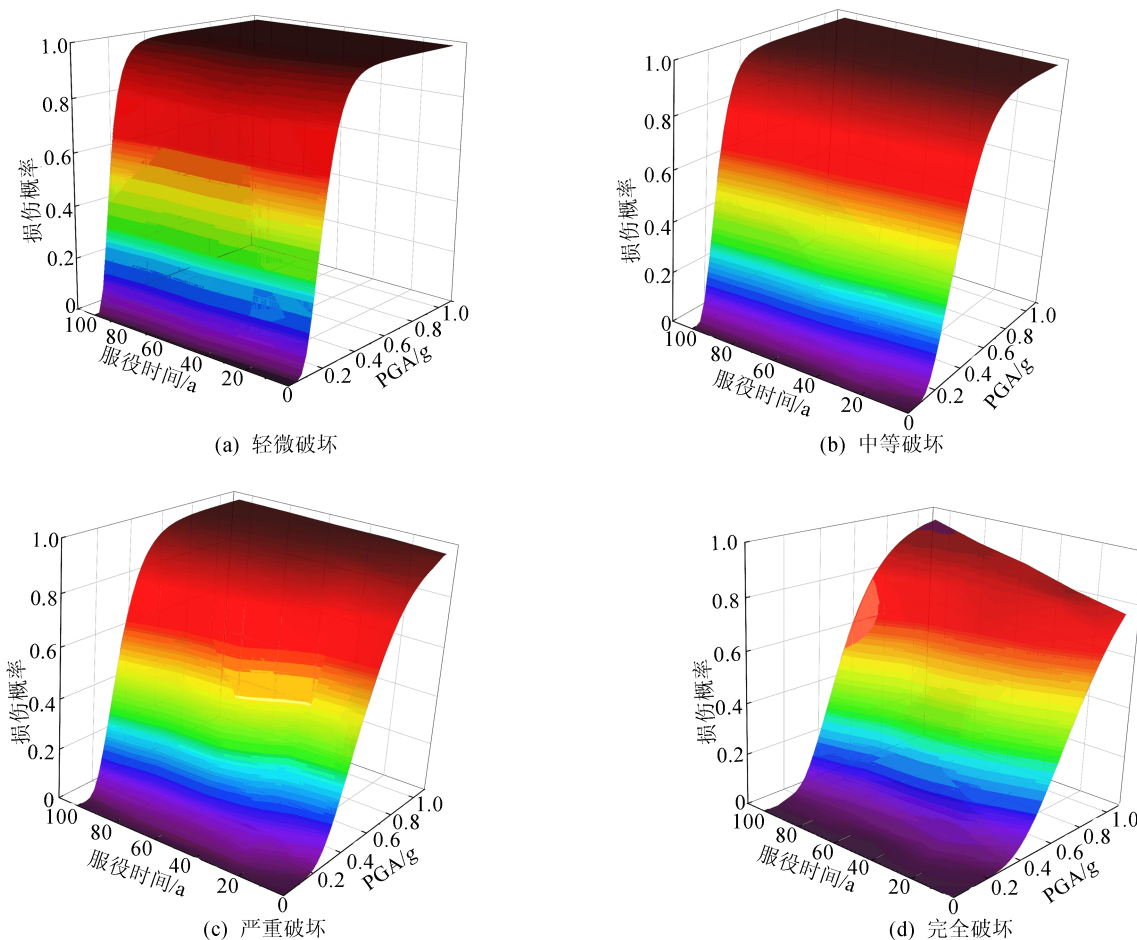


图 7 全寿命周期系统地震易损性曲面

## 5 结 论

本文以某一遭受氯离子侵蚀的大跨度拱桥为例，首先基于 Kriging 模型建立了桥墩与支座的易损性曲线，随后采用 Kriging 与 LHS 结合的方式，由 Monte Carlo 抽样得到全桥系统的易损性曲面，对案例桥梁在地震与服役环境侵蚀综合作用下进行损伤概率分析，得到结论如下。

1) 基于 Kriging 模型建立的桥墩与支座的易损性曲线与有限元分析结果对比，能够在保证精度较高的前提下显著提升分析效率，在考虑参数不确定性及时变分析中应用效果较好。

2) 易损性评估时，若仅用单个最易损构件的易损性来衡量桥梁结构的易损性往往会高估结构的抗震性能，由 Monte Carlo 抽样得到的体系易损性曲线反映结构抗震性能更加真实合理。

3) 基于全寿命周期设计理念，建立了不同服役时间的体系的损伤概率曲面。桥梁体系在 4 级损伤状态下，因材料时变效应导致桥梁的地震需求增加，同时抗震能力降低，其失效概率随着服役时间的增加呈现不同程度的增大，最大值可达 55.4%，因此有必要考虑运营期内主要材料劣化效应对整体结构抗震性能的影响。

4) 研究可为基于性能的新桥概率性抗震设计及既有桥梁地震风险评估提供参考。

## [参 考 文 献]

- [1] 钟剑, 万华平, 任伟新, 等. 全概率理论斜拉桥地震风险分析[J]. 振动工程学报, 2018, 31(4): 654-661.
- [2] ZHONG J, MAO Y H, YUAN X Z. Lifetime seismic risk assessment of bridges with construction and aging consideration[J]. Structures, 2023, 47: 2259-2272.

- [3] 李立峰,吴文朋,胡思聪,等. 考虑氯离子侵蚀的高墩桥梁时变地震易损性分析[J]. 工程力学,2016,33(1):163-170.
- [4] RAHMAN H S,ALIREZA-KREZA G. Application of artificial neural network kriging and inverse distance weighting models for estimation of scour depth around bridge pier with bed sill[J]. Journal of Software Engineering and Applications,2010,3(10):944-964.
- [5] ROY R,HINDUJA S,TETI R. Recent advances in engineering design optimization: challenges and future trends [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2008,57(2):697-715.
- [6] 谢延敏. 基于 Kriging 模型和灰色关联分析的板料成形工艺稳健优化设计研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [7] 袁万城,王建国,庞于涛,等. 基于 Kriging 模型的桥梁结构易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2016,37(11):1504-1509.
- [8] 李超,李宏男. 考虑氯离子腐蚀作用的近海桥梁结构全寿命抗震性能评价[J]. 振动与冲击,2014,33(11):70-77.
- [9] DURA C. Statistical quantification of the variables in the limit state functions[R]. Britain; The European Union-Brite EuRam3,2000.
- [10] 胡思聪,王连华,李立峰,等. 非一致氯离子侵蚀下近海桥梁时变地震易损性研究[J]. 土木工程学报,2019,52(4):62-71,97.
- [11] DU Y G,CLARK LA,CHAN A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars [J]. Magazine of Concrete Research,2005,57(3):135-147.
- [12] VU K A T,STEWART M G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models[J]. Structural Safety,2000,22(4):313-333.
- [13] 王浩杰. 高墩大跨连续刚构桥全寿命周期地震易损性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2021.
- [14] PANG Y,WU X,SHEN G, et al. Seismic fragility analysis of cable-stayed bridges considering different sources of uncertainties[J]. Journal of Bridge Engineering,2014,19(4):111-122.
- [15] 吴文朋. 考虑不确定性的钢筋混凝土桥梁地震易损性研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [16] HWANG H,LIU J B,CHUI Y H. Seismic fragility analysis of highway bridges[R]. Memphis; Center for Earthquake Research and Information The University of Memphis,2001.
- [17] 国家铁路局. 铁路桥梁钢支座:TB/T 1853—2018[S]. 北京:中国铁路经济规划研究院有限公司,2018:1-23.
- [18] CORNELL C A,JALAYER F,HAMBURGER R, et al. Probabilistic basis for 2000s AC federal emergency management agency steel moment frame guidelines[J]. Journal of Structural Engineering,2002,128(4):526-533.
- [19] NIELSON B,DESROCHER R. Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2007,36(6):823-839.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1380 页)

## [参 考 文 献]

- [1] KUBIER A,WILKINR T,PICHLER T. Cadmium in soils and groundwater; a review [J]. Applied Geochemistry,2019,108:104388.
- [2] BURGER J. Assessment and management of risk to wildlife from cadmium [J]. Science of The Total Environment,2008,389(1):37-45.
- [3] GODT J,SCHEIDIG F,GROSSE-SIESTRUP C, et al. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health [J]. Journal of Occupational Medicine and Toxicology,2006,1:22.
- [4] BERNARD A. Cadmium and its adverse effects on human health [J]. Indian Journal of Medical Research,2008,128(4):557.
- [5] NAWAB J,KHAN S,AAMIR M, et al. Organic amendments impact the availability of heavy metal (loid) s in mine-impacted soil and their phytoremediation by *Penisium americanum* and *Sorghum bicolor* [J]. Environmental Science and Pollution Research,2016,23(3):2381-2390.
- [6] BURKE M P,HOGUE T S,KINOSHITA A M, et al. Pre- and post-fire pollutant loads in an urban fringe watershed in Southern California[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2013,185(12):10131-10145.
- [7] NAN Z,LI J,ZHANG J, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions[J]. Science of The Total Environment,2002,285(1/2/3):187-195.
- [8] LI Z Y,MA Z W,VAN DER KUIJP T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China; pollution and health risk assessment[J]. Science of The Total Environment,2014,468/469:843-853.
- [9] AZUBUIKE C C,CHIKERE C B,OKPOKWASILI G C. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2016,32(11):1-18.
- [10] ALI H,KHAN E,SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals: concepts and applications [J]. Chemosphere,2013,91(7):869-881.

(责任编辑 闫杏丽)