

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.019

# 考虑不确定性斜拉桥参数的重要性与易损性分析

何程瑞伟, 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:**许多结构参数对桥梁数值模型的计算结果产生影响,结构的恒载、阻尼以及相关材料特性等参数涉及的不确定性被称为建模不确定性。研究表明建模不确定性的存在使得结构易损性曲线的偏差程度达到70%,因此在地震易损性分析中考虑不确定性很有必要。文章采用一种基于随机森林(random forest, RF)模型的概率地震需求模型(probabilistic seismic demand model, PSDM)易损性计算方法,分析桥梁构件的材料特性、荷载条件和构件几何特性等不确定因素对桥梁易损性的影响,并从中筛选出重要的不确定性参数。借助随机森林模型的学习与预测功能对结构易损性曲线进行预测。

**关键词:**独塔斜拉桥;建模不确定性;随机森林(RF)模型;概率地震需求模型(PSDM);易损性曲线

**中图分类号:**U441.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)08-1134-07

## Parameter importance and vulnerability analysis of cable-stayed bridge considering uncertainty

HE Chengruiwei, HE Peixiang

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

**Abstract:** Many structural parameters, such as the dead load, damping and related material properties of the structure, will affect the calculation results of the bridge numerical model. The uncertainties involved in these parameters are called modeling uncertainties. The research shows that the deviation of the structural vulnerability curve reaches 70% due to the modeling uncertainties, so it is necessary to consider the uncertainty in the seismic vulnerability analysis. This paper uses a probabilistic seismic demand model(PSDM) vulnerability calculation method based on random forest(RF) model to analyze the impact of uncertain factors such as the material characteristics, load conditions and geometric characteristics of bridge components on the bridge vulnerability, and screens out important uncertain parameters. The structural vulnerability curve is predicted by the learning and prediction function of RF model.

**Key words:** single-tower cable-stayed bridge; modeling uncertainty; random forest(RF) model; probabilistic seismic demand model(PSDM); vulnerability curve

基于性能的抗震设计理论提出以来,得到学者们的广泛重视与研究,成为未来抗震设计的主要侧重方向。地震动存在随机性,结构自身存在建模不确定性,使得基于性能的抗震设计准确性难以保证。文献[1]提出基于性能的抗震设计需要以概率理论为基础,建立概率地震需求模型

(probabilistic seismic demand model, PSDM)成为关键一环;文献[2]将调幅后的地震动荷载输入到非线性桥梁有限元模型中,分级进行动力时程分析,将计算得到的地震需求与各构件损伤极限状态进行比较,得到各构件的各级损伤概率;文献[3]对某特大桥梁进行动力非线性分析,建立概率

收稿日期:2023-01-16;修回日期:2023-02-20

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:何程瑞伟(1997—),男,安徽合肥人,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。

地震需求模型,并对比结构无阻尼器和有阻尼器的增量动力分析结果,绘制结构易损性曲线。在进行 PSDM 分析时,对于不同结构往往选用不同的地震动反应指标来衡量结构响应程度。文献[4]以桥墩柱位移延性比、支座和桥台的位移作为损伤指标,结合传统增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)和扩展 PSDM 2 种方法对桥梁进行地震易损性分析,并绘制地震易损性曲线;文献[5]利用易损性方法对斜拉桥是否设置拉索减震支座进行研究,并得到塔底弯矩和墩梁位移的易损性曲线,通过基于概率的分析研究表明,拉索减震支座能够有效地限制墩梁的相对位移,同时还能够适当地减小塔底的弯矩。

相关结构的数值模型地震响应大小除了与地震动参数密切相关外,还受到材料和结构层次的建模不确定性因素影响。文献[6]研究表明结构在受到外荷载达到即将破坏的状态时,建模不确定性对易损性分析结果影响较大,且建模不确定性与地震动随机性之间会产生耦合效应,放大此类影响,因此在地震易损性分析中需要考虑结构不确定性。

传统的结构易损性分析存在计算成本较高的不足,而机器学习中的一些分类回归算法可以根据相对较少的训练数据集进行回归分析,并提出预测结果,从而节省计算时间。随机森林(random forest, RF)是由文献[7]开发的一种分类回归模型。在大量研究中,随机森林模型在震害评估与地震响应预测中表现出良好性能<sup>[8-9]</sup>。文献[10]针对高寒复杂环境下高性能混凝土耐久性预测和优化问题,建立一种非支配排序遗传算法混合模型,该模型基于随机森林与带精英策略,能够准确预测高性能混凝土相关参数并实现多目标配合比优化;文献[11]提出一种桁架结构损伤程度预测算法,其基于随机森林模型,在考虑不同损伤程度的前提下,对桁架结构敏感度做出有效判定,与其他同类型回归算法相比,精确度得到较大提高,从而能够有效预测桁架结构健康状态;文献[12]对脉冲地震波的关键参数进行系统分析,通过时程分析建立不同自振周期桥墩的地震响应数据库,进行脉冲参数对结构响应的分析,利用随机森林模型进行脉冲参数间相对重要性分析,比较不同参数在不同桥墩高度下的重要性系数,得到对结构地震响应影响显著的关键参数,并进一步研究结构周期与脉冲周期的耦合作用对结构地震响应的影响。

本文采用 RF 模型进行建模不确定性参数重要性评估,将结构不确定性和材料不确定性参数作为特征参数进行特征筛选,并用重要性指数定量衡量参数重要性程度。本文以某水滴形独塔斜拉桥为背景桥梁,以 ANSYS 为计算平台,采用基于 RF 模型的 PSDM 方法对建模不确定性参数进行重要性分析,并对结构易损性曲线进行预测和验证,结果表明,此方法能够在保证预测精度的前提下,减少时程分析的计算量,大大提高结构易损性分析速度。

## 1 基于 PSDM 的地震易损性分析

### 1.1 PSDM 易损性分析原理

PSDM 方法首先假设地震需求  $D$  和抗震能力  $C$  服从某种概率分布,然后根据结构易损性的定义结合概率论知识得到结构工程需求参数(engineering demand parameter, EDP)与地震动强度指标(intensity measures, IM)的统计关系。

### 1.2 相关计算公式

失效概率  $P_f$  计算公式为:

$$P_f = P(D \geq C | I_M) = \Phi\left(\frac{\ln(D | I_M) - \ln C}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|I_M}^2}}\right) \quad (1)$$

其中: $\Phi$  为正态分布函数; $D | I_M$  为地震动强度为  $I_M$  时的地震需求; $\beta_C$ 、 $\beta_{D|I_M}$  分别为抗震能力和地震需求标准差。

当采用指数函数描述  $D | I_M$  与  $I_M$  之间的关系时,有

$$\ln(D | I_M) = b \ln I_M + \ln a \quad (2)$$

其中, $a$ 、 $b$  为线性回归参数,将式(2)代入式(1),有

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln(D | I_M) - \ln C}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|I_M}^2}}\right) = \Phi\left(\frac{b \ln I_M + \ln a - \ln C}{\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|I_M}^2}}\right) \quad (3)$$

参考文献[13],本文选取地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)作为地震动强度指标, $\sqrt{\beta_C^2 + \beta_{D|I_M}^2}$ 可取为 0.5。

## 2 基于 RF 模型的参数重要性分析

### 2.1 RF 模型介绍

RF 模型由多个分类和回归树(classification and regression tree, CART)进行构建的,决策树的每个分支都代表一种可能的决策。每棵树都是

通过 Bootstrap 抽样方法从整个数据集中抽取一个子集来进行训练的,而其他未被选中的样本则构成了包外(out of bag, OOB)数据。当这些决策树组成随机森林后,每棵决策树都将对输入的新样本进行预测,并综合所有树的预测结果聚合生成最终预测。RF 模型的优点在于每个随机采样过程都保证了随机性,因此即使不对决策树进行剪枝,也可以保证不会出现过拟合的情况。

为了避免每个特征的不同范围所造成的差异,在创建数据样本前,需要对输入特征参数进行归一化处理。为保证计算模型良好的收敛性,本文使用线性函数归一化(min-max scaling)方法对原始数据进行等比例缩放。

随机森林模型的一个重要功能就是在进行随机森林的训练时,可以确定输入参数的相对重要性系数。随机森林模型示意图如图 1 所示,特征  $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$  为建模不确定参数,  $Y$  为输出参数。如前所述,包外数据不用于构建决策树,可以用于评估变量的重要性。每个特征的重要性根据其减少回归均方误差的贡献进行评估。每棵树都会生成  $X_i$  的重要系数,然后所有树重要性系数值的平均值作为该特征的重要系数。

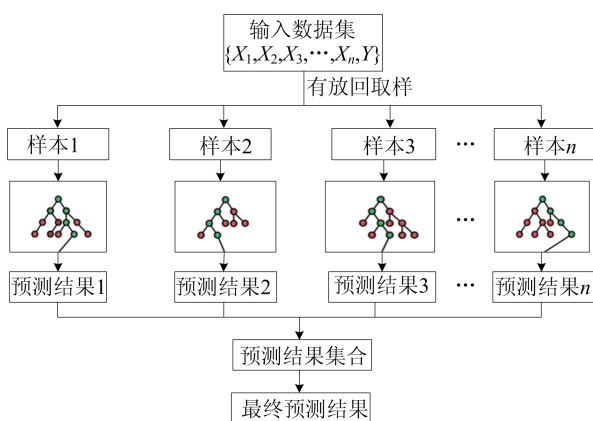


图 1 随机森林模型示意图

## 2.2 RF 模型建立步骤

- 1) 选取合适的输入特征指标和输出参数,以利用模型研究输入特征指标对输出参数的影响。
- 2) 选取若干数据样本作为训练集,对 RF 模型进行训练,并对输入特征值进行重要性评估。
- 3) 选取若干数据样本作为测试集,验证 RF 模型预测结果的准确性。
- 4) 根据预测准确性评估对 RF 模型参数进行优化。

5) 输出最终预测结果。

## 3 建模不确定性分类

在建立随机森林模型时,将建模不确定性参数确定为输入特征指标,参考文献[14]的研究,将结构抗震倒塌能力中位值  $m_R$  确定为输出参数,即可对建模不确定性参数实施重要性评估,挑选出对地震易损性曲线影响较大的若干种特征指标,从而为后续易损性分析和易损性曲线预测提供帮助。

### 3.1 结构不确定性

结构不确定性主要是指与结构质量、刚度和阻尼相关的不确定性。本文重点研究结构荷载、阻尼比、混凝土保护层厚度和钢筋直径 4 种结构不确定性参数。结构阻尼比参考文献[3],恒荷载、截面几何特性参考文献[15-16]。

### 3.2 材料不确定性

材料层次的不确定性可以理解为与材料本构模型相关的不确定性。独塔斜拉桥结构包含桥塔上部钢箱、桥塔下部混凝土和钢筋 3 种材料,具体桥塔节段分布如图 2 所示,由于本节主要讨论与桥塔相关的材料不确定性,因此重点研究桥塔上部钢材弹性模量、钢材屈服强度和桥塔下部混凝土弹性模量、钢筋弹性模量、钢筋屈服强度 5 种材料不确定性参数。不确定性参数均值以及分布特征参考文献[13,17-18]。

结构和材料不确定性参数特征见表 1 所列。建立桥梁有限元模型后,同时考虑这 9 种参数不确定性对结构的影响,输入地震波计算出结构动响应后,利用随机森林模型进行参数重要性评估以及易损性曲线预测。

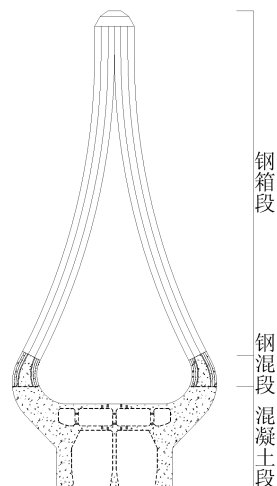


图 2 桥塔节段分布

表 1 不确定性参数特征

类别	模型参数	平均值	变异系数	分布类型
结构不确定性	混凝土密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2 650	0.070	正态分布
	黏滞阻尼比	0.03	0.300	正态分布
	保护层厚度/mm	30	0.200	正态分布
	钢筋直径/mm	12	0.035	正态分布
材料不确定性	钢材弹性模量/(10 <sup>5</sup> MPa)	2.1	0.030	对数正态
	钢材屈服强度/MPa	345	0.090	对数正态
	混凝土弹性模量/(10 <sup>4</sup> MPa)	3.45	0.030	对数正态
	钢筋弹性模量/(10 <sup>5</sup> MPa)	2.0	0.030	对数正态
	钢筋屈服强度/MPa	335,400	0.090	对数正态

## 4 算例分析

### 4.1 结构建模

全桥 ANSYS 模型如图 3 所示。

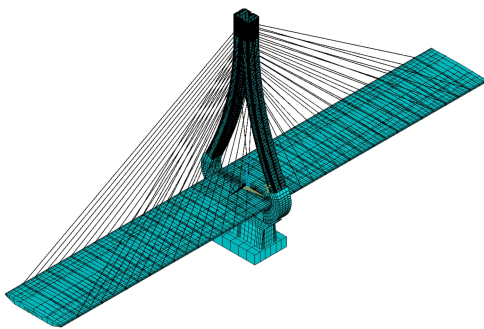


图 3 全桥 ANSYS 模型

本文以某水滴形独塔双跨双索面半漂浮体系斜拉桥为背景桥梁,桥梁跨径为  $2 \times 124$  m,主梁采用预应力混凝土双边箱梁,主塔采用钢-混组合

水滴形桥塔,主塔下部采用矩形承台及群桩基础。采用 ANSYS 软件建立全桥非线性有限元模型,桥塔及桥面采用 BEAM188 单元,斜拉索采用 LINK10 单元,阻尼采用 Rayleigh 阻尼,混凝土采用未考虑混凝土抗拉强度的修正 Kent-Park 混凝土本构关系,钢材采用理想弹塑性模型来模拟应力-应变关系。

### 4.2 地震动选择

本文根据桥梁的场地类型和抗震设防等级,参考中国地震动参数区划图<sup>[19]</sup>,得到该场地设计特征周期为 0.4 s,地震动峰值加速度为 0.1g,设计地震分组第 1 组。以设计反应谱为目标反应谱,从太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)地震波数据库中选取 15 条地震波作为时程分析用地震波,见表 2 所列,并将地震波从 0.1g~1.0g 分 10 级调幅,得到 150 条地震波数据。

表 2 时程分析用地震波

编号	地震名称	年份	测站名称	里氏震级	PGA/g
RSN3	Humbolt Bay	1937	Ferndale City Hall	5.80	0.036 3
RSN5	Northwest Calif-01	1937	Ferndale City Hall	5.50	0.150 1
RSN9	Borrego	1942	El Centro Array #9	6.50	0.065 9
RSN12	Kern County	1952	LA-Hollywood Stor FF	7.36	0.042 2
RSN22	El Alamo	1956	El Centro Array #9	6.80	0.033 6
RSN32	Parkfield	1966	San Luis Obispo	6.19	0.011 7
RSN37	Borrego Mtn	1968	LA-Hollywood Stor FF	6.63	0.012 6
RSN51	San Fernando	1971	2516 Via Tejon PV	6.61	0.025 8
RSN123	Friuli Italy-01	1976	Conegliano	6.50	0.049 5
RSN137	Tabas Iran	1978	Bajestan	7.35	0.090 7
RSN166	Imperial Valley-06	1979	Coachella Canal #4	6.53	0.038 1
RSN216	Livermore-01	1980	Tracy-Sewage Treatm Plant	5.80	0.048 7
RSN280	Trinidad	1980	Rio Dell Overpass-FF	7.20	0.061 6
RSN283	Irpinia Italy-01	1980	Arienzo	6.90	0.026 6
RSN323	“Coalinga-01”	1983	Parkfield-Cholame 12W	6.36	0.021 9

### 4.3 地震易损性曲线

参考正交试验表 L<sub>50</sub> 设置 50 个模型作为训练集,考虑混凝土密度、黏滞阻尼比等 9 个建模不确

定性因素,每个因素划分 5 水平,参数水平参考表 1 中变异系数确定其上下界,以 4.2 节中处理得到的 150 条地震动记录作为输入,对全桥模型

进行时程分析,综合比较桥梁各构件之后,选取支座作为易损性研究对象,根据文献[20]得知该桥活动支座最大纵向允许位移值为 150 mm,确定支座损伤指标,见表 3 所列。

表 3 支座损伤指标

损伤状态	位移/mm
轻微破坏	$45 < \mu \leq 60$
中等破坏	$60 < \mu \leq 120$
严重破坏	$120 < \mu \leq 150$
完全破坏	$150 < \mu$

不考虑建模不确定性的原模型与个别考虑建模不确定性实验模型的构件易损性曲线对比如图 4 所示。

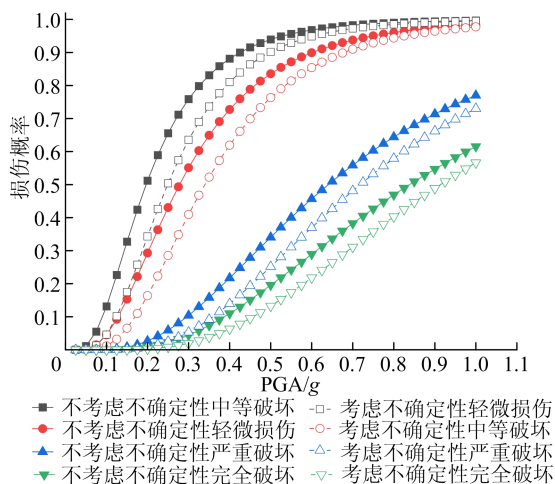


图 4 是否考虑建模不确定性的支座易损性曲线对比

4 个损伤等级受建模不确定性的影响较大,在考虑不确定性后轻微损伤等级下  $m_R$  提高了 26.6%,中等破坏等级下  $m_R$  提高了 22.2%,严重

破坏等级下  $m_R$  提高了 12.1%,完全破坏等级下  $m_R$  提高了 9.02%。由此可见, $m_R$  受不确定性的影响较大,且损伤等级越低,影响程度越高,因此在实际易损性分析过程中,需考虑建模不确定性对易损性曲线的影响。

另外本研究设置 15 个实验组作为验证预测精度的测试集,测试集中不确定性参数的组合不与训练集中的组合重复,以保证精度测试的真实性。

4.4 建模不确定性参数重要性分析

通过随机森林模型的参数重要性指数对 9 个不确定性参数进行重要性评估,各参数重要性指数如图 5 所示,见表 4 所列。由图 5 可知,结构层次中的不确定性参数只有黏滞阻尼比的重要性指数较高,且随着破坏等级的提高而提高,除此以外,其他不确定性参数的重要性均较低;材料层次仅混凝土弹性模量重要性较高,且重要性高于黏滞阻尼比,其重要性指数随着破坏等级的提高而下降。

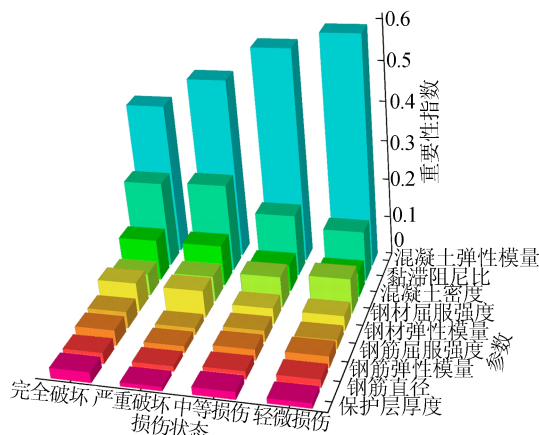


图 5 不确定性参数重要性指数比较

表 4 不确定性参数重要性指数

类别	不确定性参数	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
结构层	黏滞阻尼比	0.129	0.160	0.228	0.223
	混凝土密度	0.062	0.068	0.106	0.108
	保护层厚度	0.013	0.020	0.011	0.027
	钢筋直径	0.021	0.021	0.014	0.028
材料层	混凝土弹性模量	0.588	0.549	0.466	0.393
	钢材弹性模量	0.039	0.042	0.071	0.076
	钢材屈服强度	0.091	0.080	0.066	0.058
	钢筋弹性模量	0.030	0.028	0.018	0.041
	钢筋屈服强度	0.023	0.029	0.018	0.043

4.5 基于随机森林模型的易损性曲线预测  
对于结构而言,在确定损伤等级及其对应结

构损伤界限值后,参考 1.2 节,当采用指数函数描述  $D | I_M$  与  $I_M$  之间的关系时,根据式(2)仅需确

定  $a$ 、 $b$  值就可以绘制出结构的易损性曲线,而随机森林模型除了可以对输入参数进行重要性评估外,另一个重要功能是可以对新样本进行预测,随机森林模型可以利用训练集进行机器学习与模拟,建立预测模型,可直接对参数  $a$ 、 $b$  进行预测,与传统方法相比可以节约大量时间成本。

本文依据前 50 个模型的数值模拟数据,建立关于参数  $a$ 、 $b$  的随机森林预测模型,参数  $a$ 、 $b$  的训练集预测结果与测试集预测结果如图 6、图 7 所示。

由图 6b、图 7b 可知,参数  $a$  和参数  $b$  测试集回归函数的检验均方根误差分别为 0.027 6 和 0.015 7,拟合优度分别为 0.911 2 和 0.824 3,由此可以判断出随机森林模型对测试样本的预测值与实验值十分接近,说明其预测精度和泛化能力优秀。

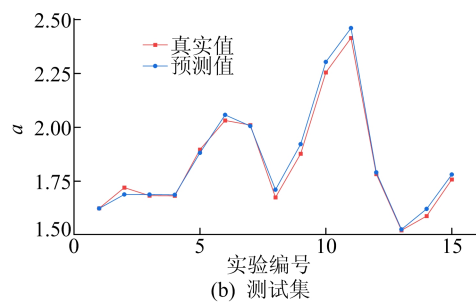
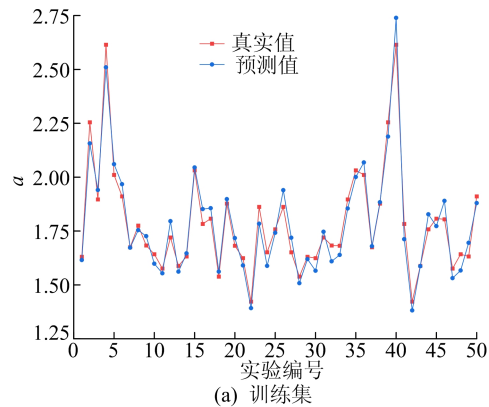


图 6 参数  $a$  随机森林预测结果

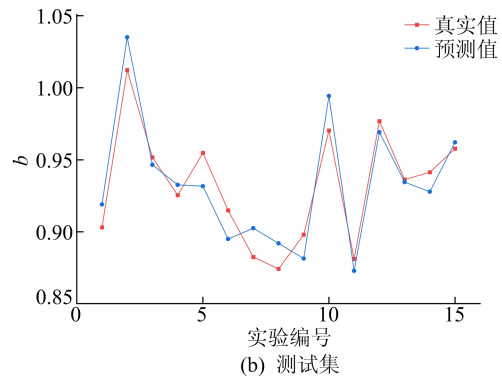


图 7 参数  $b$  随机森林预测结果

根据随机森林模型对参数  $a$ 、 $b$  的预测,可以在不进行模型计算的基础上,实现对结构易损性曲线的预测。随机选择实验 3、实验 10 的实验模型,对照其实际计算与随机森林预测的易损性曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,实际计算得到的易损性曲线与预测曲线基本吻合,偏差较小,验证了随机森林模型预测易损性曲线精度较高。

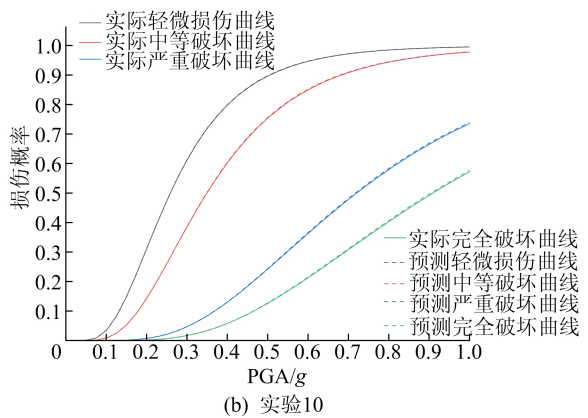
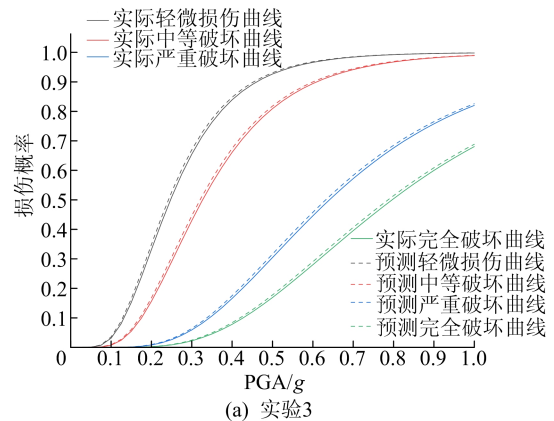


图 8 实际计算与预测的易损性曲线对比

## 5 结 论

1) 基于随机森林模型对建模不确定性因素

进行重要性评估,结构层次不确定性中,黏滞阻尼比对桥梁模型的地震响应影响最大,且其重要性随破坏等级的提高而提高;材料层次不确定性中,混凝土弹性模量对桥梁模型的地震响应影响最大,且其重要性随破坏等级的提高而降低。

2) 基于随机森林模型的训练与预测功能,对结构易损性曲线的相关参数进行了预测,预测参数的拟合优度最低为 0.824 3,最高为 0.911 2,验证了随机森林模型不仅可以在考虑建模不确定性的情况下进行结构易损性预测,而且其预测精度和泛化能力优秀。

3) 利用随机森林模型的预测功能,对考虑建模不确定性的结构易损性曲线进行预测,预测曲线与实际计算曲线基本吻合,误差较小。

### [参 考 文 献]

- [1] BERTERO R D, BERTERO V V. Performance-based seismic engineering; the need for a reliable conceptual comprehensive approach[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 627-652.
- [2] 黄飞鸿, 何沛祥, 吴腾飞. 下承式钢管混凝土拱桥地震易损性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(6): 801-807.
- [3] 曾志和, 樊剑, 余倩倩. 基于性能的桥梁结构概率地震需求分析[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 156-162.
- [4] 马彦兵, 何凯峰. 扩展 PSDM 与 IDA 方法在桥梁地震易损性分析中的应用对比研究[J]. 西部交通科技, 2020(2): 123-126, 133.
- [5] 钟剑庞, 于涛, 沈国煜, 等. 采用拉索减震支座的斜拉桥地震易损性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 351-357.
- [6] 吕大刚, 于晓辉, 王光远. 单地震动记录随机增量动力分析[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 1): 53-58.
- [7] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [8] LIU H, CHEN C, GUO Z, et al. Overall grouting compactness detection of bridge prestressed bellows based on RF feature selection and the GA-SVM model[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124323.
- [9] SOLEIMANI F. Analytical seismic performance and sensitivity evaluation of bridges based on random decision forest framework[J]. Structures, 2021, 32: 329-341.
- [10] 吴贤国, 王雷, 陈虹宇, 等. 基于随机森林-NSGA II 高性能混凝土耐久性配合比的多目标优化研究[J]. 材料导报, 2022, 36(17): 115-121.
- [11] 姜璐, 吕瑞宏, 赵艺伟. 基于随机森林的桁架结构损伤程度预测[J]. 微处理机, 2022, 43(1): 43-47.
- [12] ZHONG J, YANG T, PANG Y, et al. A novel structure-pulse coupled model for quantifying the column ductility demand under pulse-like GMs[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2021: 1-19.
- [13] AGENCY F E M. Hazards99 user's Manual [EB/OL]. [2022-11-01]. <https://www.fema.gov/zh-hans/flood-maps/tools-resources/flood-map-products/hazus/user-technical-manuals>.
- [14] 于晓辉, 吕大刚. 考虑结构不确定性的地震倒塌易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 8-14.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 13.
- [16] 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.
- [17] Joint Committee on Structural Safety. Probabilistic model code[EB/OL]. (2001-01-01)[2022-11-01]. <http://www.jcss.eth.ch>.
- [18] 蔡斌. 钢筋混凝土可靠度分析相关参数研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2011, 28(6): 1-3.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 82.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁球型支座规格系列: JT/T 854—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 10.

(责任编辑 张 镛)

### · 信息与动态 ·

## 《合肥工业大学学报(自然科学版)》欢迎投稿

《合肥工业大学学报(自然科学版)》是以基础理论、应用科学和工程技术为主的综合性学术刊物,主要刊登机械与汽车工程、仪器科学与光电工程、材料科学与工程、电气与自动化工程、计算机与信息工程、电子科学与工程、土木与水利工程、资源与环境工程、交通工程、化学工程、生物与食品工程、医药工程、管理科学与工程、数理科学以及新兴科学技术等领域的研究论文、科研成果、学术讨论、专题综述及动态报道,将优先刊发基金资助项目的论文。本刊自 2020 年 1 期改为彩色印刷,欢迎高等院校师生、科研院所和企事业单位的广大科技工作者向本刊投稿,在线投稿网址: <http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。