工程力学
Engineering Mechanics
ISSN 1000-4750,CN 11-2595/O3

《工程力学》网络首发论文

题目：　我国 RC 框架结构地震易损性曲线的可信性分析
作者：　李文豪，曲哲，任浩
收稿日期：　2025-03-03
网络首发日期：　2025-07-14
引用格式：　李文豪，曲哲，任浩. 我国 RC 框架结构地震易损性曲线的可信性分析[J/OL]. 工程力学. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20250714.1516.014

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-07-14 16:49:12　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20250714.1516.014

我国 RC 框架结构地震易损性曲线的可信性分析

李文豪[1,2,3]，曲　哲[1,2]，任浩[4]

（1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室，哈尔滨 150080；2.地震灾害防治应急管理部重点实验室，三河 065201；

3. 河南交投交通建设集团有限公司，郑州 450000； 4. 陕西省地震局，西安 710068）

摘　要：钢筋混凝土框架作为我国建筑抗震体系的核心载体，其易损性模型可信性直接影响地震风险评估精度。我国学者已研究获得大量 RC 框架易损性模型，但这些成果大多基于数值模拟方法，比较分散、孤立，缺乏系统梳理和检验。本研究提出一种基于机器学习的地震易损性数据清洗方法。首先构建中文文献易损性曲线数据库，采用机器学习模型建立结构参数与易损性曲线 50%超越概率对应的谱加速度 S_{am}(T1)的映射关系，采用最优选择策略通过敏感性分析识别离群样本和合群样本，分析其在样本空间中的分布特征并结合 SHAP 与实际工程经验对模型进行验证；并以 HAZUS 中的典型 RC 框架结构为例，讨论了本文模型拟合易损性曲线与灾害评估模型提供的易损性曲线的差异。结果表明：我国现有中文文献中 RC 框架原型结构的特征取值具有不均匀性的特点；我国现行中文文献计算的 RC 框架结构易损性曲线大部分是可信的；相较传统灾害评估模型，本文机器学习给出的易损性曲线在参数维度与样本覆盖度上具有更准确的描述能力，更适用于单体结构及区域化的精细评估。基于本文研究内容，开发了可判断给定曲线可信性及快速生成给定 RC 框架结构易损性曲线的可视化程序。

关键词：钢筋混凝土框架结构，地震易损性，机器学习，支持向量回归，增量动力分析

中图分类号：TU375.4　**文献标识码：**A　doi：10.6052/j.issn.1000-4750.2025.03.0088

CREDIBILITY ANALYSIS OF SEISMIC FRAGILITY CURVES FOR REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES IN CHINA

LI Wen-hao[1,2,3], QU Zhe[1,2], REN Hao[4]

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,

China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Sanhe 065201, China;

3. Henan Communications Investment Construction Group Company Limited, Zhengzhou 450000, China;

4. Earthquake Agency of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China)

Abstract: Reinforced concrete (RC) frame is predominant of China's seismic-resistant building systems. The credibility of its fragility model directly affects the accuracy of earthquake risk assessment. Although significant advances have been made in seismic fragility modeling of RC frames, the results are mostly based on numerical simulations, lacking systematic integration and validation. This study developed a machine learning-driven cleaning method. Based on a database comprising fragility curves from Chinese literature, the mapping relationship between structural parameters and spectral acceleration $S_{am}(T_1)$ was firstly established by machine learning models, which corresponds to a 50% exceedance probability in the fragility curve. A sensitivity simulation was performed to identify disqualified samples and qualified samples within the fragility curve database with greedy algorithm. An analysis of distribution characteristics in the sample space was performed combined with SHAP (Shapley Additive Explanations) and engineering experience. The differences between the fragility curves fitted by this paper's model and the curves provided by disaster assessment software were discussed with the examples of classical RC frame

收稿日期：2025-03-03；修改日期：2025-06-21
基金项目：国家自然科学基金优秀青年科学基金项目（52122811）
通信作者：曲 哲（1983—），男，陕西人，研究员，博士，博导，主要从事建筑地震损伤控制方面的研究(E-mail: quz@iem.com.cn).
作者简介：李文豪（1999—），男，河南人，硕士，主要从事建筑地震易损性研究(E-mail: lwenhao99@163.com).
任 浩（1991—），男，陕西人，硕士，高工，主要从事地震灾害风险评估相关研究(E-mail: haorenon@126.com)

structures in HAZUS. The results indicate that the engineering parameters of the RC frame prototype structure in available Chinese literature are non-uniform. Fragility curves given in current Chinese literature for RC frame structures are mostly credible. The comparison with HAZUS benchmarks demonstrates that the machine learning models show advantages in parametric dimensions and material coverage with more applicability to single structure. A visualization platform based on research has been developed for evaluating the credibility of existing fragility curves and automatically generating structure-specific fragility curves for RC frame systems rapidly.
Keywords: RC frame structure; seismic fragility; machine learning; support vector regression; incremental dynamic analysis

为得到更为精确可信的灾害评估结果，对城市建筑进行精细化震灾风险评估慢慢提上日程。作为社会抗震防灾能力的重要“基础设施”，地震灾害模型是在震前预测城乡各类承灾体的地震灾害风险和在震后快速评估地震灾害损失的重要工具。目前主流的地震灾害模型均采用基于概率的震害预测方法，即某承灾体的地震风险（Seismic Risk）可由地震危险性模型（Hazard）、工程损失模型（Vulnerability）和承灾体数据库（Exposure）共同决定，如下式（1）所示[1]：

$$\text{Seimic Risk} = \text{Hazad} \times \text{Exposure} \times \text{Vulnerability} \quad (1)$$

式中，承灾体的工程损失模型通常由其易损性（Fragility）模型及损失比模型等两部分组成。其中，承灾体的易损性（Fragility）表示承灾体在不同强度等级的地震动作用下达到或超越某一损伤界限状态的概率，可见其是链接地震危险性和地震损失风险之间的不可或缺的纽带。因此，快速得到承灾体准确、可信的易损性曲线，对于地震灾害风险预测和损失评估的准确性至关重要。

根据数据来源不同，主要可采用：实际震害统计数据；试验研究；专家经验判断；数值模拟分析等四种方法求得承灾体的易损性曲线。例如，钟江荣等[2]通过云南地区砌体结构震害资料收集与分析，给出了云南地区城区与农村砌体结构的易损性曲线，属于方法（1）；代旷宇等[3]通过收集满足我国现行设计规范要求的钢筋混凝土（RC）框架柱的拟静力试验数据，建立了 RC 柱在各损伤状态下所对应的易损性曲线，属于方法（2）；尹之潜[4]通过建立了预测建筑震害矩阵与目前现有建筑震害的联系，计算得到了 2000 年时我国 4 类易损性建筑的震害矩阵，属于方法（3）。

上述三种方法各有所长，亦有所短。基于震害统计数据的方法虽然最能反映承灾体地震破坏的实际情况，但其适用性往往受限于实际震害数据的缺乏、不均衡和低质量（如过大的离散性）；试验研究方法则主要受限于实验设施的能力，适于建立结构或非结构构件层次的易损性，而难以大量重复地开展整体结构或建筑的地震易损性试验；基于经验判断的方法则严重依赖于专家的主观判断，不易检验且难以迭代更新[5]。

相比之下，随着非线性动力时程分析技术的长足发展，上述方法（4），即基于数值模拟的方法能够克服上述三种方法的不足，在承灾体的地震易损性分析中得到了日益广泛的应用[6]。近年来，我国学者采用基于有限元方法的增量动力分析对不同类型建筑结构的地震易损性开展了大量工作，取得了丰硕的成果。例如，吕大刚和于晓辉[7]基于解析表达式，对地震易损性分析及地震风险评估的数学基础进行了详细推导，同时将其应用到钢筋混凝土框架结构的抗震性能评估中[8]；吴巧云[9]对一栋钢筋混凝土框架结构在不同烈度等级和不同地震动记录下的易损性进行评估和对比分析；张令心[10]采用拉丁超立方采样技术建立了 14 栋典型多层砌体民房住宅结构，并基于动力时程分析结果建立了这些代表性结构的地震易损性模型；郑山锁[11]考虑了钢材锈蚀作用，以一个 15 层 3 跨的钢结构框架为例，通过动力时程分析来研究钢结构易损性随服役时间的变化；党争[12]通过有限元分析计算得到了一栋纤维增强混凝土框架-剪力墙结构的地震易损性曲线；吕西林[13]采用增量动力分析的方法得到了一栋超高层复杂结构的地震易损性曲线；何益斌[14]也采用动力时程分析方法对高层钢框架-混凝土核心筒这一复杂混合结构体系的地震易损性开展了研究。此外，基于有限元的数值模拟方法也被应用于铁路站房[15]、阀厅结构[16]、大型变电站主厂房[17]等工业建筑的易损性分析当中。

然而，基于数值模拟的易损性分析方法也有

其局限性。这主要表现为数值模型的准确性，即数值模拟的结果能否正确反映承灾体的实际地震损伤。一方面，数值模型不可避免地存在不同程度的近似简化，例如，在建模时往往忽略土-结相互作用[18]、结构的不确定性[19]、填充墙[20]等非结构构件的影响；另一方面，即使是使用同类模型和相同的分析软件，受参数取值和建模细节等因素的影响，不同人也可能得到差异较大的分析结果[21]。针对地震倒塌易损性，周洲等人[22]通过搜集整理我国不同学者近年来的研究成果而建立的易损性数据库显示，不同学者提出的易损性模型具有很大的离散性。文献[22]的调研还表明，在不同结构体系中，我国学者更多地关注钢筋混凝土框架结构。

综上所述，一方面，我国学者利用数值模拟方法构建 RC 框架结构地震易损性模型方面已取得了丰硕的成果，另一方面，这些成果又较为分散、独立，甚至互相矛盾。为充分利用现有的易损性模型成果，本研究旨在提出一种整合现有易损性曲线的方法，利用机器学习的强大非线性拟合能力来梳理清洗已有成果，建立起一个较为可信的易损性曲线数据网络，作为结构精细化灾害评估的基础。同时新的成果也可以经过所提出的清洗步骤后，筛选补充进来。为此，以更多关注的钢筋混凝土框架结构为例，本文首先收集了近年来中文文献中各类钢筋混凝土框架结构的地震易损性分析成果，这些文章经历了严格的审稿流程，较为严谨，在此前提下，建立 RC 框架结构易损性模型数据库；以原型结构的关键参数作为特征，易损性曲线 50%超越概率对应的谱加速度 $S_{am}(T_1)$ 作为标签，利用具有强非线性拟合能力的机器学习模型建立结构关键参数与易损性参数之间的映射关系，并以此为基础，通过敏感性分析识别数据库中的离群样本和合群样本，视离群样本的可信性较差，合群样本的可信性较高，从而评估数据库中易损性曲线的可信性；并以 HAZUS 中的典型 RC 框架结构为例，将本文模型拟合的易损性曲线与以 HAZUS 为代表的灾害评估软件提供的易损性曲线进行了对比。基于研究内容，开发了可判断给定曲线可信性及快速生成给定 RC 框架结构易损性曲线的可视化程序，便于在精细化灾害评估中应用。

1 易损性模型数据库

1.1 基于增量动力分析的易损性分析流程

承灾体的地震易损性（F）是其在不同强度等级（Intensity measure）的地震动作用下达到或超越某一损伤界限状态的概率（P），可表示为式（2）[7]：

$$F(x)=P\left[D\geq C|\ IM=x\right] \tag{2}$$

式中：x 为地震动强度等级；D 为结构的地震需求；C 为结构的抗震能力；P 为达到或超越某一损伤界限状态的概率。

一般认为，地震动强度 IM 与工程需求参数 θ 之间存在如下式（3）关系：

$$\ln(\theta)=A+B\times\ln(IM) \tag{3}$$

假设 θ_D 和 θ_c 均服从对数正态分布，则结构在地震动作用下达到某一极限状态的条件超越概率 P 可以由下式（4）获得：

$$P(IM=x)=\phi\left[\frac{-\ln(\theta_C/\theta_D)}{\sqrt{\beta_C^2+\beta_D^2}}\right] \tag{4}$$

式中：ϕ为标准正态分布累积函数；β_C、β_D 分别为 θ_C 和 θ_D 的对数标准差。根据 IM 参数的不同，$\sqrt{\beta_C^2+\beta_D^2}$ [23]可取不同的值进行估算。式（4）可化简为式（5）：

$$P(IM=x)=\phi\left(\frac{\ln x-\mu}{\beta}\right) \tag{5}$$

式中，μ、β 分别为承灾体达到预设的损伤界限状态的地震动强度等级 IM 的对数中位值与标准差。

虽然我国学者早在 20 世纪 90 年代就曾采用类似于增量动力分析的方法研究高层建筑的地震反应特性[24]，增量动力分析（Incremental Dynamic Analysis, IDA）作为一种系统性分析方法，在 21 世纪初由 VAMVATSIKOS 和 CORNELL 正式提出[25, 26]，并逐渐在地震工程领域得到广泛应用[27-28]。利用增量动力分析的结果（即 IDA 曲线），可以方便地得到易损性分析所需的式（4）中的 μ、β 这两个关键参数，如图 1 所示。

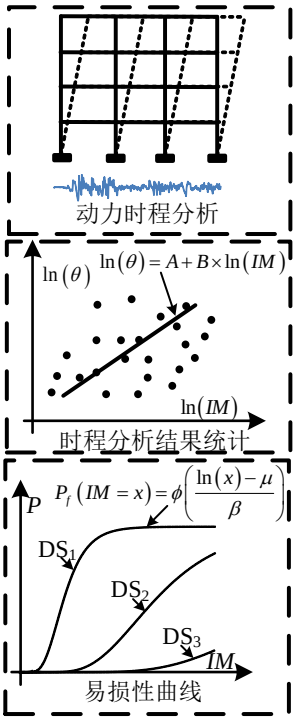


图 1 基于 IDA 的易损性分析的常规流程

Fig.1 Process for IDA-based fragility analysis

1.2 钢筋混凝土框架结构地震易损性曲线数据库

本文首先检索和整理了近年来我国 56 位学者在钢筋混凝土框架结构地震易损性方面发表的学位论文及期刊论文，从中遴选出 59 篇文献作为建立易损性曲线数据库的基础。其中，期刊论文 20 篇，硕士学位论文 36 篇，博士学位论文 3 篇[29-87]，如图 2 所示。

入选的文献应符合以下要求：1) 文献以按我国规范设计的建筑结构作为主要研究对象；2) 文献中给出了所研究钢筋混凝土框架结构的地震易损性函数或地震易损性曲线; 3) 文献中的易损性曲线是通过增量动力分析的方法求得的；4）文献中给出了钢筋混凝土框架原型结构的以下信息：

对于钢筋混凝土框架原型结构，参考陕西省建筑抽样详查表格的规定，主要搜集建筑信息、抗震设防情况、构件属性等三个方面的信息，如图 3 所示。建筑信息包括建筑层数、高度、跨度、宽度等；抗震设防情况包括设防类别、抗震等级、所执行的抗震规范的版本、设防烈度、场地类别和场地特征周期等；构件属性包括底层柱截面尺寸和所采用的钢筋、混凝土强度等级。

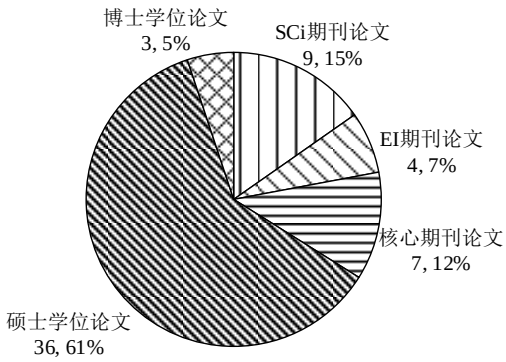


图 2 文献调研来源分布

Fig.2 Distribution of literature research sources

此外，数据库还包括了易损性曲线所对应的损伤状态（以最大层间位移角限值 θ_{max} 表示）、50%超越概率对应的谱加速度 $S_{am}(T_1)$和对数标准差 β 等信息。其中，50%超越概率对应的谱加速度 $S_{am}(T_1)$ 可由式（6）获得：

$$S_{am}(T_1)=e^{\mu} \tag{6}$$

式中，μ 为易损性曲线的对数均值。

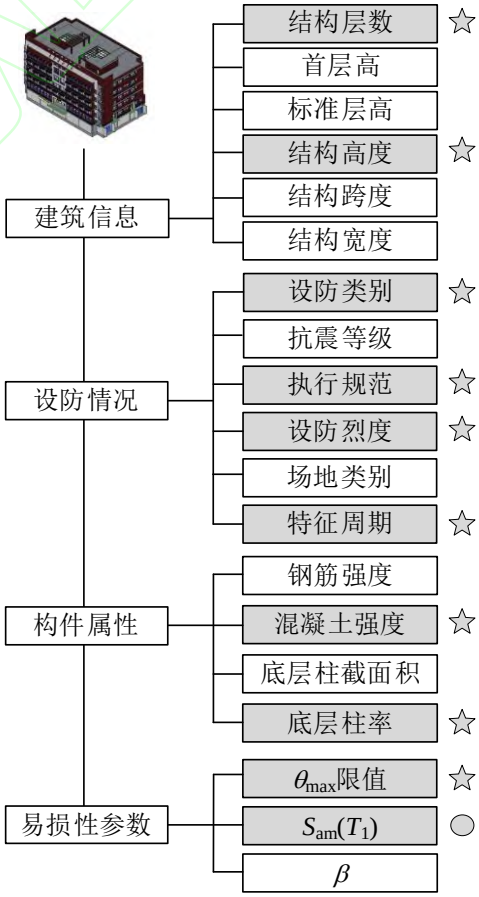


图 3 钢筋混凝土框架结构易损性特征参数

Fig.3 Features of fragility of reinforced concrete

frame structure

通过提取文献中的地震易损性曲线及其参数，共搜集了 632 条地震易损性曲线，形成了按照我国抗震规范设计的钢筋混凝土框架结构的地震易损性数据库。其中部分样本的字段取值如表 1 所示。

表 1 数据库中示例样本主要参数

Table 1 Parameters of example samples in the database

主要参数	53 号样本	107 号样本	481 号样本
执行规范	2010	2010	1989
结构层数	8	6	12
首层高/m	3.6	3.3	3.6
标准层高/m	3.3	3.3	3.6
结构高度/m	26.7	19.8	43.2
设防烈度	VIII	VIII	VII
场地类别	II	II	III
场地特征周期/s	0.55	0.35	0.35
设防类别	丙	丙	丙
抗震等级	一	二	二
跨度/m	3	3	3
宽度/m	14.4	15.3	22.5
混凝土强度	C35	C35	C30
钢筋等级	HRB400	HRB400	HRB335
底层柱截面积/m^2	0.3025	0.3025	0.19
底层柱率	1.3%	1.1%	1.2%
θ_{max} 限值	0.09	0.02	0.036
$S_{am}(T_1)/g$	1.931	1.412	0.4089
对数标准差 β	0.3443	0.3055	0.4881

为了排除某些意义重复的参数之间的共线性问题可能对分析结果造成的影响，例如设防烈度与抗震等级、场地类别与场地特征周期，在全部参数中进一步筛选出如图 3 中以星号标记的关键参数，包括设计规范、结构层数、结构高度、设防烈度、设防类别、特征周期、混凝土强度、底层柱率以及破坏状态对应的层间位移角。这些关键参数将作为下文机器学习模型的输入特征，同时，将 $S_{am}(T_1)$作为机器学习模型的输出标签（在图 3 中以圆圈标记）。易损性参数中的对数标准差 β 与各个特征之间不具有明确的相关性，在本文中暂不予讨论。

类似于日本混凝土结构抗震设计中采用的墙率，底层柱率 W_r 综合反映了结构跨度、宽度、柱截面积以及层数等多个因素的综合影响：是某一框架建筑底层的柱截面面积和 A_c（cm²）与底层以上所有楼层的楼面积（m²）$\sum A_f$ 之比。由于大多数文献皆取单榀框架结构进行有限元分析，且已将层数作为一个单独关键特征考虑，因此本文将柱率定义稍加修改：底层柱率为某一榀框架建筑底层的柱截面面积 A_c（m²）与该层楼面面积（m²）A_f 之比，如式（7）所示。

$$W_r = \frac{A_C}{A_f} \tag{7}$$

如文献中未给出结构的平面模型，则在计算底层柱率时，假设单榀框架在正交方向的宽度等于平面的跨度，如图 4 所示。

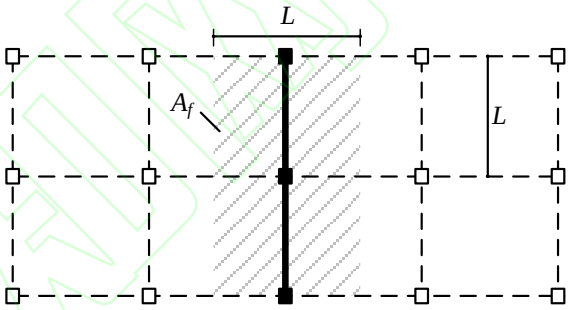


图 4 底层柱率示意图

Fig.4 Diagram of bottom story column ratio

1.3 数据库样本的统计信息

数据库中关键参数的统计信息如图 5 所示。在所有 632 个样本对应的原型结构所采用的抗震设计规范覆盖了 1989 年[88]、2001 年[89]、2010[90]年等三个版本，但采用 2010 年版抗震规范的最多，达到了 592 个，而采用 2001 年和 1989 年版规范的样本只占不到 10%（图 5（a）），这与采用增量动力分析方法的文献大都集中在 2010 年之后，而年代较早的研究则多采用经验判断和震害资料统计的方法有关。

数据库中样本原型结构的抗震设防烈度涵盖 6 度~9 度，其中 7 度和 8 度设防的样本最多，分别有 194 个和 368 个，9 度区的样本数量最少，只有 20 个（图 5（b））。设防类别均为乙类或丙类设防，并未涉及甲类和丁类设防，且其中绝大多数为丙类设防，占样本总数的约 90%（图 5（c））；大多数样本均为 II 类场地，场地特征周期以 0.35s 和 0.4s 居多（图 5（d））。

数据库中样本原型结构的柱混凝土强度从 C30 至 C50 不等，符合规范对混凝土强度等级的规定，其中，采用 C30 的样本数量最多，约占总数的 54%（图 5（e））。

数据库中样本原型结构的结构高度分布在 6.6m~47.4m 的范围内，其中大部分样本结构高度分布在 10m~30m 的区间内，共有 496 个（图 5（f））；原型结构的层数在 2 到 12 层都有分布，与高度的分布相一致，《民用建筑设计通则》[91]将结构划分为低层、多层、中高层以及高层四个类别，而多层原型结构的数量最多，有 539 个（图 5（g））。这反映出我国学者在研究混凝土框架结构的易损性时，普遍认为多层结构更具代表性。

数据库中样本原型结构的底层柱率取值分布在 0.0048~0.05 之间，绝大部分样本原型结构的柱率小于 0.03，约占样本总数的 86%，其中又以柱率分布在 0.01~0.02 之间的样本数量最多，有 253 个（图 5（h））。

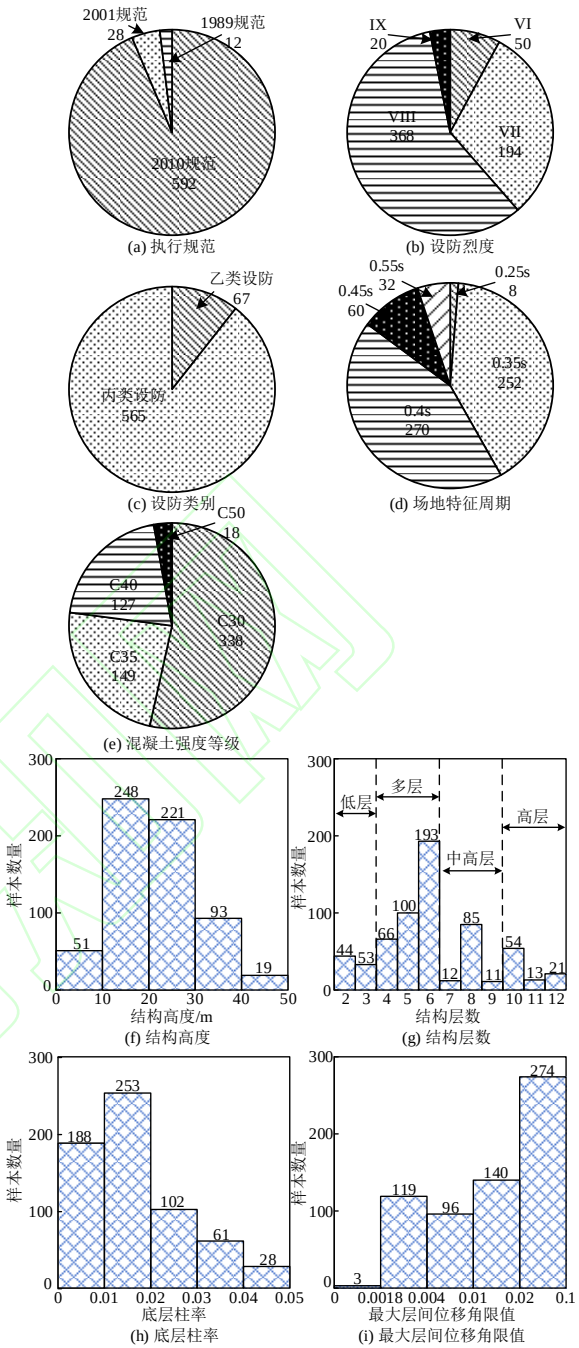


图 5 数据库中样本关键特征的分布

Fig.5 Distributions of key parameters of samples in the database

在易损性参数方面，所有样本均以最大层间位移角限值 θ_{max} 作为工程需求参数，易损性曲线最大层间位移角限值 θ_{max} 分布在 1/550~1/10 之间。按照 1/550~1/250、1/250~1/100、1/100~1/50、1/50~1/10 将这些样本划分为四个区间，近似代表轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏等四个破坏状态，则所有样本中对应于毁坏状态的样本最

多，有 274 个（图 5（i））。这反映出我国学者对钢筋混凝土框架结构达到毁坏状态的易损性更感兴趣。可见，目前中文文献中针对我国钢筋混凝土框架结构地震易损性的研究较多地关注采用 2010 版抗震规范设计的 7 度、8 度设防 II 类场地上的多层建筑，且较多地关注毁坏状态对应的易损性。数据库中样本的部分工程参数呈现较明显的不均匀分布。

2 基于机器学习模型的可信性分析

2.1 可信性分析方法

本文基于最优组合策略，利用机器学习模型的非线性拟合能力，按照图 6 所示的技术路线进行可信性分析。理想情况下，随着离群样本被剥离，剩余样本的 R^2（*MSE*）变化应为先增高（减小）后达到稳态最后出现波动，即大部分样本是合群的，并视离群样本的可信性较差，而合群样本的可信性较高，从而评估数据库中易损性曲线的可信性。

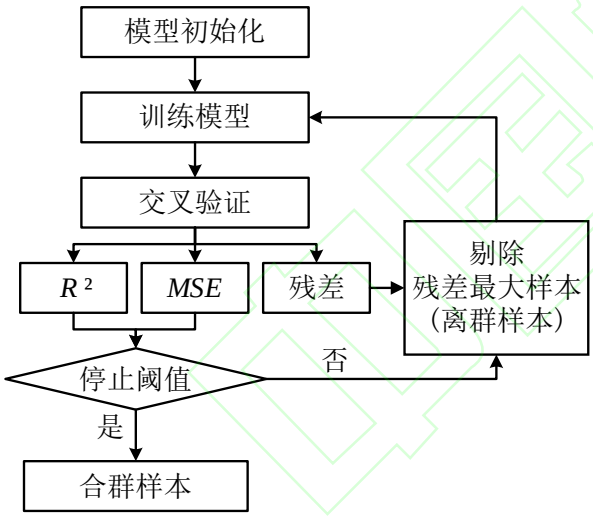


图 6 可信性分析流程图

Fig.6 Credibility analysis process diagram

在这一流程中，需要首先训练合适的机器学习模型，以建立关键参数和输出标签 $S_{am}(T_1)$之间的非线性映射。这属于有监督学习的回归问题范畴。一般地，假设数据集 D 包含 n 个样本，即式（8）：

$$D=\{(\mathbf{x}_1,y_1),(\mathbf{x}_2,y_2),\cdots,(\mathbf{x}_n,y_n)\} \tag{8}$$

式中：$(\mathbf{x}_n,y_n)$为第 $i(i=1,2,\cdots,n)$组样本；$\mathbf{x}_i$ 为输入特征；y_i 为输出标签。机器学习的目标是通过相关算法和数据集训练 $D=\{(\mathbf{x}_1,y_1),(\mathbf{x}_2,y_2),\cdots,(\mathbf{x}_n,y_n)\}$ 预测模型 $y=f(\mathbf{x},\theta)$，使其在整个数据集上的损失函数 L 最小，如式（9）所示：

$$f=\arg_\theta \min \sum_{i=1}^{n} L\left[y_i, f(\mathbf{x}_i,\theta)\right] \tag{9}$$

式中：$f(\cdot)$为机器学习不同模型所采用的算法；θ 为算法的参数，在本文中，损失函数 L 采用 *MSE* 与 R^2。

在训练模型之前，需要对数据库中样本的关键参数进行预处理。首先，对诸如规范版本、混凝土强度等级和设防类别等非数字特征采用表 2 的映射关系进行数字化处理。

表 2 部分关键特征的数字化映射

Table 2 Mapping for digitization of some features

关键特征参数	原取值	数字化取值
采用规范	1989	0
	2001	1
	2010	2
混凝土强度等级	C30	20.1
	C35	23.4
	C40	26.8
	C50	32.4
设防类别	乙	2
	丙	3

其次，由于样本的各个特征的量纲和取值范围不一，为提高学习速度和训练精度，采用如式（10）所示的 Min-Max 函数将所有关键特征的取值归一化到区间[0,1]。

$$x_{new}=\frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \tag{10}$$

式中：x_{new} 为归一化后的特征取值；x 为样本特征的原取值；x_{max} 和 x_{min} 分别为样本特征的原取值的最大和最小值。

鉴于样本数量相对有限，采用 10 折交叉验证方法计算模型性能指标 R^2、*MSE* 以及各个样本的残差：将训练样本划分为 10 个大小相似的互斥子集；然后，每次 9 个子集的并集作为训练集，余下的一个子集作为测试集，从而获得 10 组训练/测试集，从而进行 10 次训练/测试的验证；最终将 10 次验证的均值 R^2、*MSE* 作为最终的模型 R^2、*MSE*，

将每个子集的验证结果并集作为最终的模型验证结果并计算残差。设定 R^2=0.9、MSE=0.1 为循环停止条件，如果某次循环不满足该条件，将剔除产生最大残差的样本，然后继续循环；如果满足停止条件，则结束循环，将剩余未被清洗的样本作为合群样本，剔除掉的样本作为离散样本。并以保留下来的合群样本为基础，采用相同参数进行多次拟合，选择 R^2 最好的一次拟合模型用作后续分析。

2.2 机器学习算法的选择

针对数据库样本容量较小的特点，本文选用线性回归、人工神经网络和支持向量回归等三种机器学习算法进行图 6 所示的可信性分析，分别介绍如下。

（1）线性回归

线性回归模型简单便捷，是机器学习中最为基础和常用的模型之一。其核心思想是采用如式（11）所示的一次函数描述输入特征 $\mathbf{x}=\{\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2,\ldots,\mathbf{x}_n\}$ 与输出标签 y 之间的映射关系。

$$y=w_1x_1+w_2x_2+\cdots+w_nx_n+b \tag{11}$$

式中：$\mathbf{w}=\{w_1,w_2,\ldots,w_n\}$ 和 b 分别为拟合函数的斜率向量和截距；$\varepsilon=\dfrac{y_{75\%}-y_{25\%}}{1.349}$ $BoxConstraint=\dfrac{y_{75\%}-y_{25\%}}{13.49}$ 通过数据集训练确定。此外，由于 $\mathbf{w}$ 明确直观地表达了各个特征在预测中的重要性，因此线性模型具有很好的可解释性（comprehensibility）。

（2）人工神经网络

人工神经网络（ANN）是一种模拟生物神经系统的信息处理机制的机器学习算法[92]。典型的人工神经网络（ANN）包括输入层、隐含层和输出层三个部分。每一层的输入是上一层的输出，隐含层可以有多层，而输入层和输出层各只有一层。隐含层的神经元接收来自上层神经元或外部的输入信号，然后与各自的权重相乘，再与偏置相加得到的结果即为激活函数的输入，最后通过激活函数将其转换为输出信号。网络的输出不仅与激活函数和权重值有关，还与网络的连接方式相关。本文采用网络结构 BP 神经网络建立样本的 9 个关键特征与单一输出标签 $S_{am}(T_1)$之间的映射关系，如图 7 所示。其中只有一个包含 10 个神经元的隐藏层，神经元采用 ReLU 激活函数，正则化参数取 0.0001。

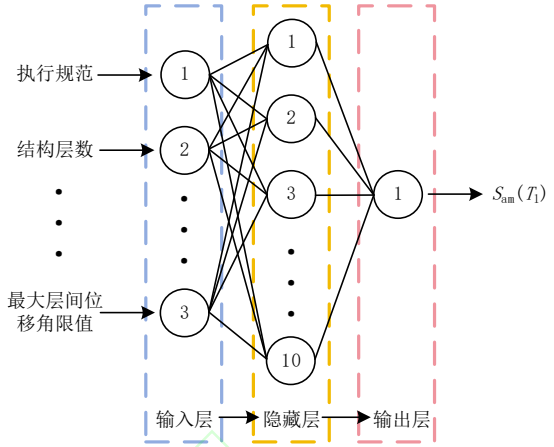


图 7 人工神经网络架构图

Fig.7 ANN architecture diagram

（3）支持向量回归

支持向量机[93]（SVM）的核心思想是将输入数据通过非线性映射转换到高维特征空间，然后在该空间中寻找一个超平面，来完成线性分类或回归。与之类似，支持向量回归（SVR）通过训练构建一个最优超平面，使其尽可能地靠近训练数据点并保持一定的容忍度，如图 8 所示，其中，蓝色虚线为模型拟合的超平面，ξ_i 为松弛变量，黑色实线和蓝色虚线之间的差值表示间隔带。蓝色点表示预测结果的误差值在可接受的范围内，红色点则表示误差范围最边界的点。本文采用三次核函数 SVR，惩罚系数（BoxConstraint）如式（12）所示，核尺度参数（KernelScale）取为 3.4，容差 ε 如式（13）所示。

$$BoxConstraint=\frac{y_{75\%}-y_{25\%}}{13.49} \tag{12}$$

$$\varepsilon=\frac{y_{75\%}-y_{25\%}}{1.349} \tag{13}$$

式中，$y_{75\%}$ 和 $y_{25\%}$ 为标签集的上四分位数和下四分位数。

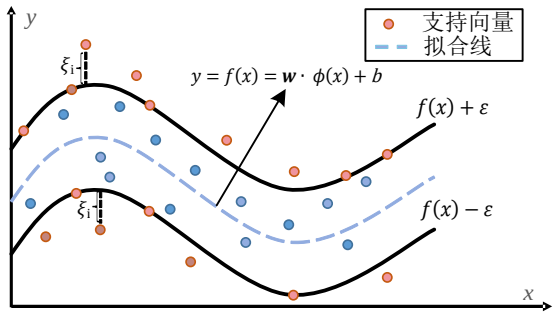


图 8 支持向量回归架构图

Fig.8 Support vector regression diagram

以图 3 中的关键特征作为输入特征，以 $S_{am}(T_1)$ 作为输出标签，分别采用上文介绍的线性回归、人工神经网络和支持向量回归，按照图 6 所示的流程对数据库中的样本进行清洗，即从原数据库中依次剔除残差最大的样本。不同机器学习模型的性能指标 *MSE* 和 R^2在清洗过程中随着剔除的离散样本数量的增加而变化的情况如图 9 所示。从图 9 可以看出，在剔除 100 个左右离群样本后，SVR 模型的 R^2已达到 0.9，，而此时 ANN 与线性回归的 R^2 值均小于 0.9，二者分别再剔除大约 90 个和 50 个离群样本后才达到设定的 R^2=0.9 的阈值。至于 *MSE*，在剔除 25 个左右离群样本后，SVR 模型的 *MSE* 已降至 0.1，此时 ANN 与线性回归的 *MSE* 均大于 0.1，分别 再剔除大约 15 个与 35 个离群样本后才达到设定的 *MSE*=0.1 的阈值。此外，在剔除掉 120 个离群样本后，SVR 模型的 *MSE* 约为 0.025，已远小于 0.1。且随着离群样本的不断剔除，SVR 模型的 R^2与 *MSE* 的变化也不断放缓，逐渐达到稳定状态，因此，下文选用 SVR 模型进行后续清洗和可信性分析，并以再剔除 120 个离群样本时停止清洗。

2.3 分析过程与结果

为了减小 SVR 算法的随机性对清洗结果的影响，重复进行 20 次图 6 所示的可信性分析流程。如果某个样本在这 20 次分析中被剔除的次数大于 5 次，则视其为离群样本；反之，则视其为合群样本，即具有较高的可信性。SVR 模型性能在可信性分析过程中的变化如图 10 所示：剔除 120 个离群样本后，关键特征 SVR 模型 20 次计算的平均 R^2 为 0.9，*MSE* 为 0.23，符合预设的阈值，性能指标 R^2与 *MSE* 的变化也与理想状态较为符合。

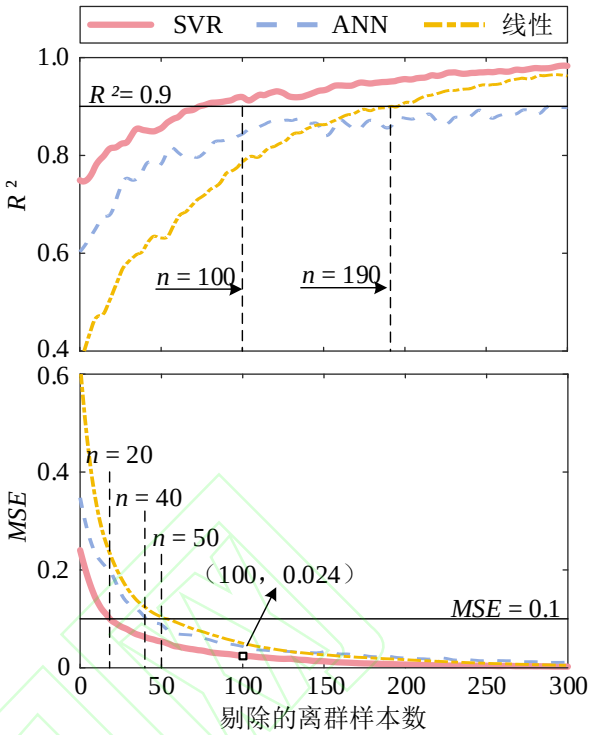


图 9 不同机器学习模型的表现

Fig.9 Performance of different machine learning models

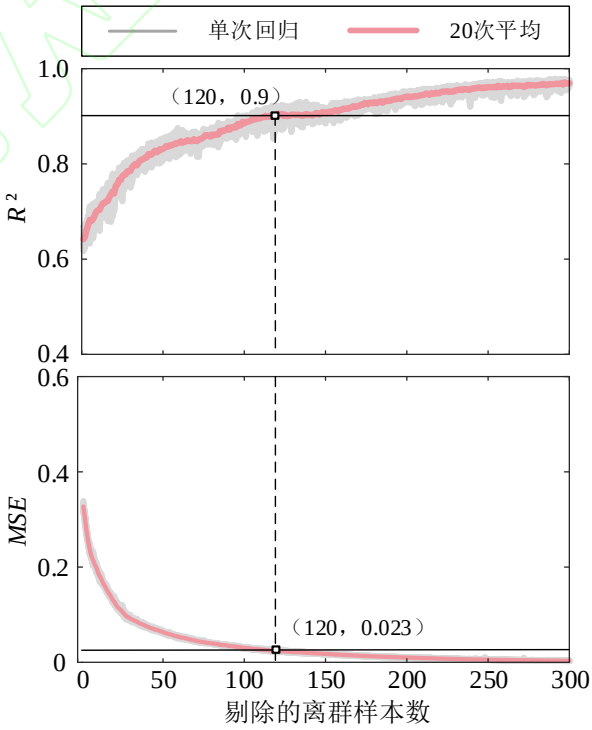


图 10 SVR 模型性能在可信性分析过程的变化

Fig.10 Performance of SVR in credibility analysis

20 次分析中所有样本被剔除的频数统计结果如图 11 所示。其中有 475 个样本在 20 次分析中从未被清洗过，约占总样本数的 75%；被清洗过 1~5

次的样本有 32 个，约占 5%，被判定为合群样本的共有 507 个；而被清洗过超过 5 次，即被判定为离群样本的有 125 个，约占 20%。说明我国现行中文文献计算的 RC 框架结构易损性曲线大部分还是可信的，离群样本有明显的独特性。

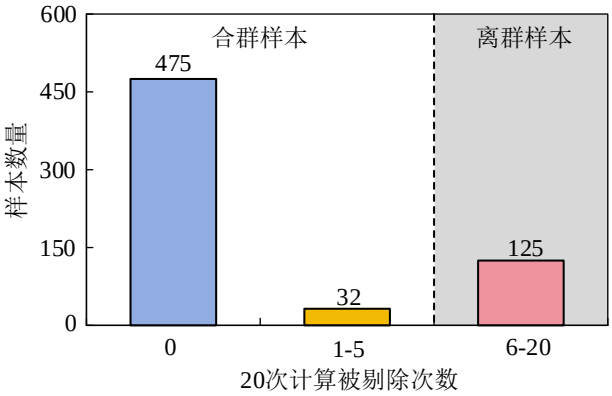


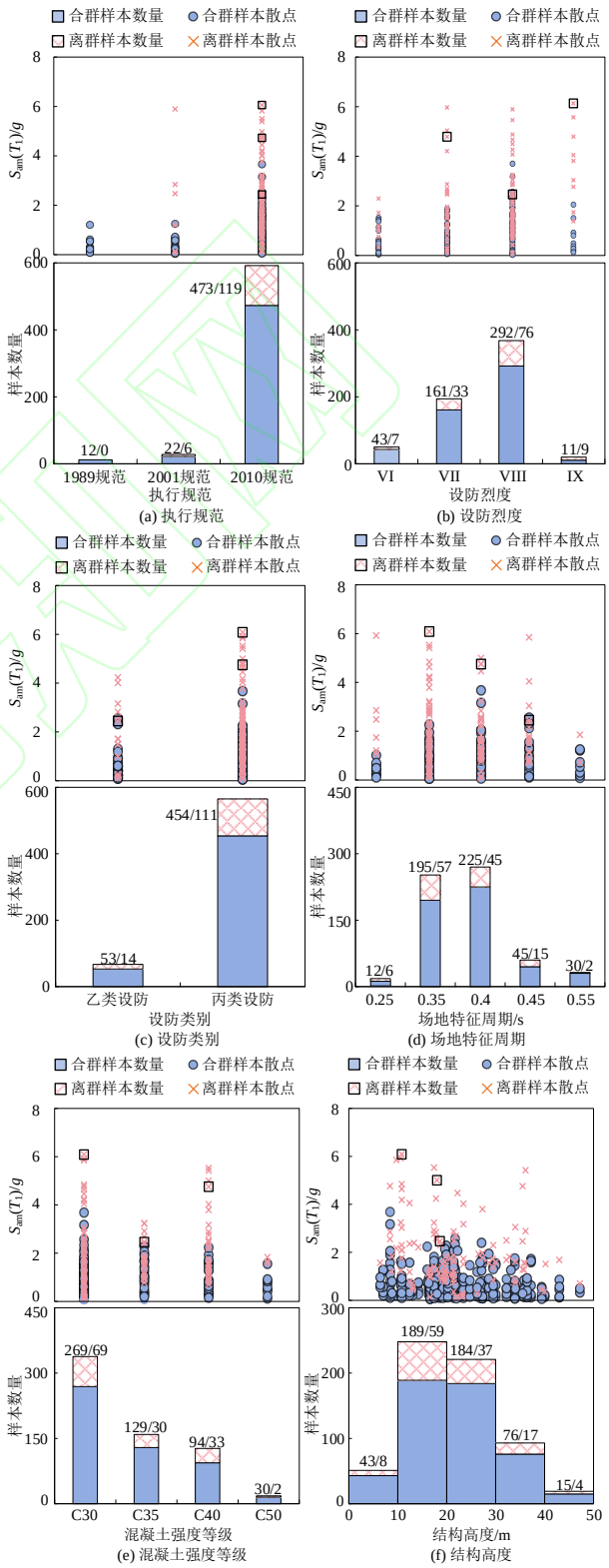
图 11 合群及离群样本数量统计

Fig.11 Numbers of qualified and disqualified samples

2.4 合群与离群样本的分布特征

保留下来的合群样本和剔除掉的离群样本的关键参数的统计分布情况如下图 12 所示。以执行规范及设防烈度为例，所有合群样本对应的原型结构所采用的抗震设计规范覆盖了 1989、2001、2010 年等三个版本，且依然是采用 2010 年版抗震规范的最多，达到了 473 个，而采用 2001 年和 1989 年版规范的样本分别只有 22 和 12 个（图 12（a））；与原数据库相比，执行规范为2010规范的样本被标记为离群样本的最多，有 119 个，剔除率（剔除的样本数/总样本数）最大的为 2001 规范样本，为 21%，执行规范为 1989 规范的样本中未出现离群样本。

合群样本中原型结构的抗震设防烈度涵盖 6~9 度，且仍是 7 度和 8 度设防的样本最多，分别有 161 个和 292 个，9 度区的样本数量最少，只有 11 个（图 12（b））；设防烈度为 8 度的样本被标记为离群样本的最多，有 76 个，剔除率最大的为 9 度样本，达到了 45%。设防类别（图 12（c））、场地特征周期（图 12（d））、混凝土强度等级（图 12(e)）、结构高度（图 12(f)）、结构层数（图 12(g)）、底层柱率（图 12(h)）及最大层间位移角限值（图 12(i)）的统计分布情况也均在下图中列出，在此不占用过多篇幅阐述。合群样本与离群样本在关键参数的各个取值上大都有分布，由于离散性的存在，各特征参数的剔除率虽未严格在20%上下浮动，但其离群样本数量随各特征取值总样本量的分布趋势保持基本一致性，未出现因特定特征取值数据量偏少而导致的系统性筛选偏差。



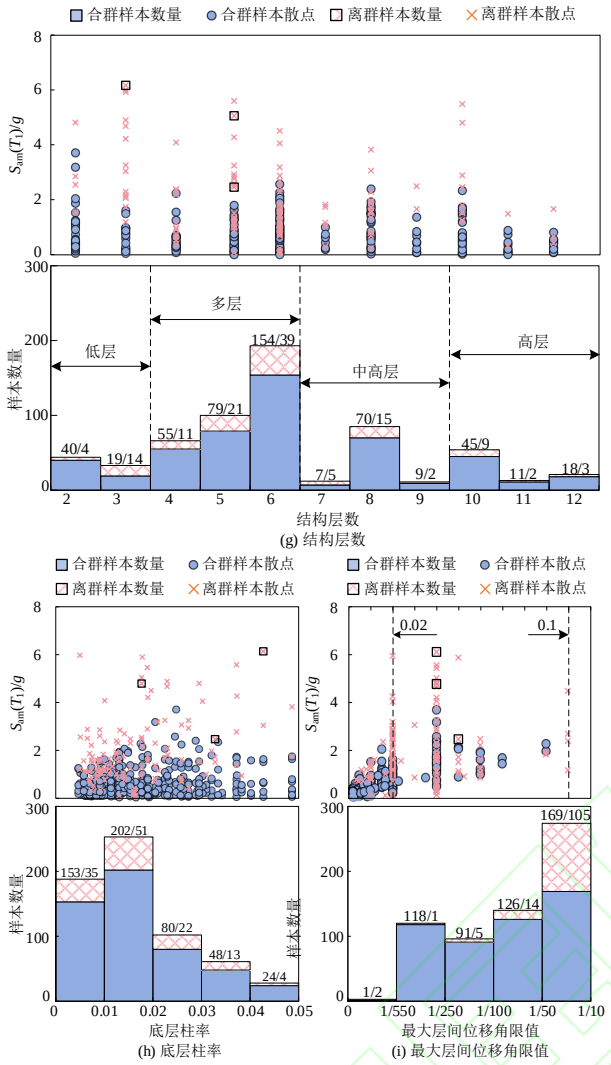


图 12 合群样本关键特征的分布

Fig.12 Distributions of key features of qualified samples in the database

图 12 中也给出了合群样本与离群样本的易损性参数 $S_{am}(T_1)$在各个关键参数取值上的分布。离群样本的 $S_{am}(T_1)$值分布在 1 到 7g 的范围内，而且离群样本的 $S_{am}(T_1)$值分布基本都位于合群样本之上，也就是说模型更倾向于认为某样本被判定为离群样本是由于其 $S_{am}(T_1)$值偏大造成的。合群样本的 $S_{am}(T_1)$值大部分分布在 0 到 4g 的范围内，尤其在 0 到 2g 的范围内分布最为集中。将离群样本的工程参数输入到采用合群样本拟合的机器学习模型中，对离群样本的 $S_{am}(T_1)$值进行修正，如下图 13 所示。

修正后，离群样本的分布基本上都集中在 0 到 4g 之间，且大多数离群样本经过修正后其 $S_{am}(T_1)$比原先的值更小。表明模型更倾向于认为离群样本的 $S_{am}(T_1)$值计算结果偏大是导致其不符合规律的主要原因。

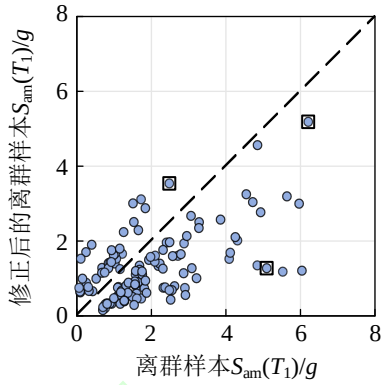


图 13 修正前后离群样本的 $S_{am}(T_1)$分布图

Fig.13Statistical plots of the analysis results of $S_{am}(T_1)$

以 213 号样本、552 号样本、621 号为例（图 12、图 13 中框选的样本），来进行离群样本的具体分析。这三个样本的关键参数取值如下表 3 所示。

表 3 离群样本示例

Table 3 Selected disqualified samples

序号	213	552	623
采用规范	2010	2010	2010
层数	5	3	5
总高/m	18.8	11	18.2
设防烈度	VIII	IX	VII
场地特征周期/s	0.45	0.35	0.4
设防类别	乙	丙	丙
混凝土强度	C35	C30	C40
柱率	0.033	0.043	0.018
θ_{max} 限值	0.05	0.04	0.04
$S_{am}(T_1)$ /g	2.48	6.21	5.09

213 号样本是一栋位于 8 度区的 5 层乙类设防结构，层间位移角为0.05。原作者计算的$S_{am}(T_1)$值为 2.48g，本文模型认为这个计算结果较小，经过合群样本拟合的机器学习模型修正后的结果为 3.54g。可能是由于该样本原型结构为乙类设防，且层间位移角及柱率取值偏大的缘故。552 号样本是一个位于 9 度区的三层结构，其柱率为 0.043。从图 11 中可以看出，层数、底层柱率、设防烈度及最大层间位移角限值等参数，几乎均为取值范围中最有利于抗震的取值。虽然模型认为它的原

计算结果偏大，但仍给出了 5.19g 的修正结果，这也是离群样本中修正结果最大的一个。623 号样本的工程参数与 213 号样本类似，原文中计算的 $S_{am}(T_1)$值为 5.09g，经过修正后模型只给出了 1.28g 的结果。可能是由于相对于 213 号样本，底层柱率的取值小了很多，只有 0.018，设防烈度与设防类别也有所降低。综合来看，三个样本在层间位移角相近的情况下，经过修正后的 $S_{am}(T_1)$值由大到小排列为 552 号样本、213 号样本、623 号样本，基本符合工程参数规律要求。

图 14 给出了合群样本与离群样本的数量随论文收录年代的变化情况。在总样本数大于 20 的年份中，2016 年离群样本所占比例最少，2021、2022 年离群样本所占比例最多。而在总样本数量比较多的 2012、2017、2019 以及 2020 年，离群样本数量占比都未远超过 20%。离群样本数量占比并没有出现随收录年代变化的趋势。

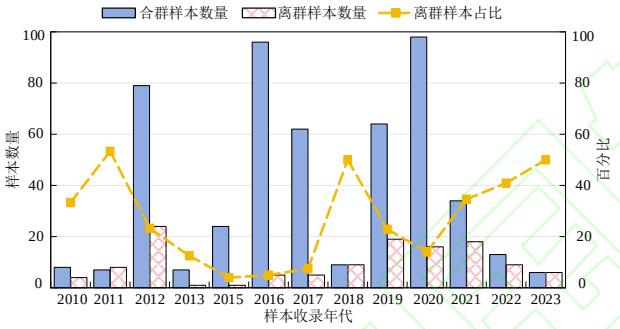


图 14 样本收录年代统计图

Fig.14 Graph of sample inclusion years

3 基于合群样本的 SVR 模型

接下来从模型可解释性的角度考察不同关键特征参数对地震易损性的影响，并与目前震害评估实践中常用的易损性模型进行对比。

3.1 可解释性

机器学习模型越复杂，其可解释性往往越差，即，虽然可以给出准确的预测，却无法解释为什么做出这样的预测。为考察机器学习模型的可解释性，LUNDBERG[94]等人提出一种 SHAP（Shapley Additive Explanations）方法。SHAP 方法基于博弈论的思想，将每个特征视为一个贡献者，量化计算其贡献值 $\boldsymbol{\varphi}$（亦称为 SHAP 值），所有特征的贡献值之和即为最终的预测结果，即输出标签，如式（14）所示：

$$f(\mathbf{x}) = \varphi_0 + \sum_{j=1}^{M} \varphi_j \tag{14}$$

式中：$f(\boldsymbol{x})$为有待解释的机器学习模型；$\boldsymbol{x}$ 为数据集中某个样本的特征取值；φ_0 为机器学习模型在预测集上的预测均值；φ_j 为第 j 个特征的贡献值（即 SHAP 值）；M 为特征的总数。

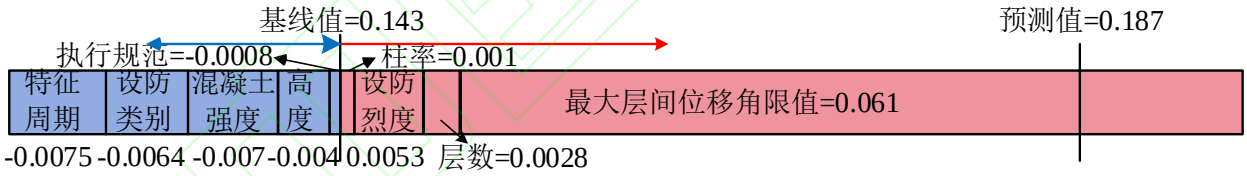


图 15 单个样本预测 SHAP 示意

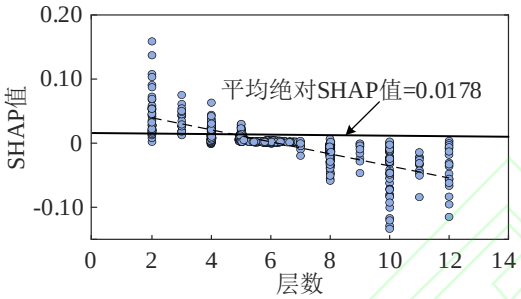
Fig.15 SHAP for a single sample prediction

由式（14）可见，模型在数据集上的预测均值 φ_0 为基线值，即如果不知道任何特征，那么模型的输出可以解释为模型在数据集上的平均预测；之后，每个特征 j 均有对应的 SHAP 值 φ_j 来解释模型如何从 φ_0 得到新的预测值；所有特征贡献值的和，解释了模型如何从基线值到最终的预测值。因此，SHAP 值可以展示所有特征参数对输出结果的定量影响。

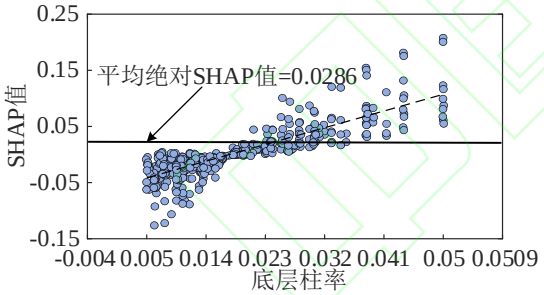
图 15 以 40 号样本的结果为例展示了这一过程。SHAP 将最终的预测分解为所有输入变量贡献的总和。基准值为所建立的 SVR 模型对整个归一化后数据库预测的平均值，为 0.143。红色色条表示输出结果增加的特征参数，而蓝色表示导致输出结果下降的特征参数，色条的长度表示相应增加和减少的程度。对于 40 号样本，最大层间位移角限值 θ_{max} 是最关键的特征参数，对输出结果有正向影响，其 SHAP 值为 0.061，结构层数、柱率与设防烈度同样对输出结果有正向影响，其 SHAP 值分别为 0.0028、0.001 和 0.0053。特征周期是对该样本预测输出结果产生负作用的最关键特征参数，其 SHAP 值分别为-0.0075，执行规范、结构高度、混凝土强度、设防类别同样对输

出结果有负向影响，其 SHAP 值分别为-0.0008、-0.004、-0.007 及-0.0064。 结合所有特征参数的基准值和 SHAP 值，最终预测结果为 0.187，与 40 号样本原始 $S_{am}(T_1)$值归一化后的结果 0.1877 接近。

除此之外，SHAP 也能从全局上对机器学习模型进行解释。某一输入特征在数据集中所有样本上的 SHAP 值可反映该特征的取值对模型预测结果的影响规律。如果某个特征的 SHAP 值随特征取值的增大而增大，则该特征则和预测结果呈正相关关系，反之亦然。以层数和底层柱率为例，图 16 给出了其在所有样本上的 SHAP 的分布。可见，随着层数的增加，各个样本中层数对应的 SHAP 值呈现下降的趋势，说明模型认为层数与输出的 $S_{am}(T_1)$呈负相关关系。相反地，模型认为底层柱率与输出的 $S_{am}(T_1)$呈正相关关系。



（a）层数的影响



（b）底层柱率的影响

图 16 典型关键特征参数 SHAP 值分布

Fig.16 SHAP distribution of typically key parameters

某一特征在所有样本上的平均绝对 SHAP 值可表示其对预测结果的重要性。例如，底层柱率的平均绝对 SHAP 值为 0.0286，而层数的平均 SHAP 值为 0.0178，小于前者，说明在该模型中，柱率对 $S_{am}(T_1)$预测结果的影响更大，也即更为重要。

图 17 按照平均绝对 SHAP 值从大到小的顺序，给出了除层间位移角限值之外的所有工程参数的 SHAP 值分布。可见，对于设防烈度、设计时采用的特征周期、混凝土强度和底层柱率等特征参数，SHAP 值总体上随着特征取值的增大而增大，说明预测的 $S_{am}(T_1)$与这些特征之间存在正相关关系；而层数、高度和设防类别等特征参数与预测的 $S_{am}(T_1)$呈负相关关系，符合工程经验。

根据平均绝对 SHAP 值的排序，各特征参数的重要性从大到小依次为柱率、结构层数、结构高度、设防烈度、设防类别、特征周期、混凝土强度和设计所执行的规范版本。

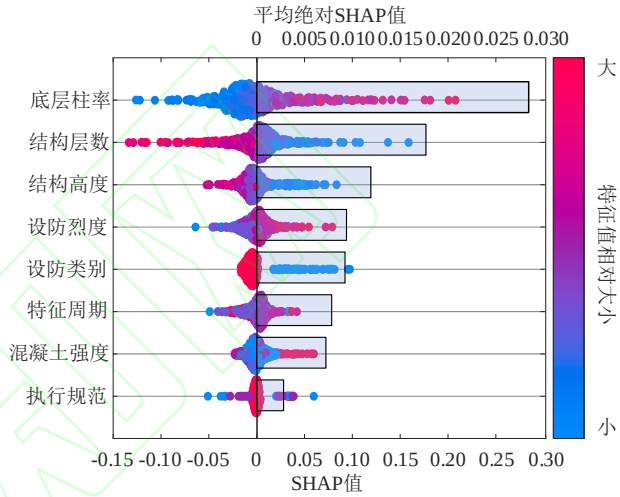


图 17 所有工程参数 SHAP 值分布图

Fig.17 Distribution of Shapley values for all engineering parameters

3.2 与现有灾害评估模型易损性曲线的对比

为探讨合群样本拟合的机器学习模型在精细化灾害评估中的可行性，以 HAZUS 模型中典型 RC 框架结构为例，对比本文模型拟合得到的易损性曲线与灾害评估模型建议的易损性曲线之间的异同。

美国联邦紧急事务管理署（Federal Emergency Management Agency, FEMA）[95]开发的 HAZUS 软件是一款用于社会经济损失估计、紧急情况预警以及灾害恢复的多灾害损失估计软件，它使用简便、分析快速、结果合理，因此得到了广泛的应用。HAZUS 软件中对一些代表性的钢筋混凝土框架结构的易损性曲线做了建议取值，以 Moderate-Code 等级下的中层 RC 结构为例，其在美国规范[96]下的中等（DS2）、毁坏（DS4）两个破坏等级的相关参数取值与对应的本文模型在中国规范下的相同参数取值如下表 4

所示：

结构层高均取为 3.6m。上表中 $PGA_{m,US}$ 为 HAZUS 建议的 Moderate-Code 等级下的中层 RC 结构 50%超越概率对应的地面峰值加速度，PGA_m 为相同工程参数下本文模型计算的 Moderate-Code 等级下的中层 RC 结构 50%超越概率对应的地面峰值加速度，由于本文所采用机器学习模型采用的输出指标是 $S_{am}(T_1)$，为了与 HAZUS 输出结果相对应，本文利用中国规范设计谱将 $S_{am}(T_1)$近似转化为 PGA_m。根据前文统计，本文模型标准差 β 取为分布数量最多的 0. 4.

表 4 中层 RC 结构在 HAZUS 与本文模型中的输入参数对比

Table 4 Comparison of the input parameters of mid-rise RC structures between HAZUS and this paper

	破坏等级	中等	毁坏
HAZUS	设防水平	Moderate-Code	
	场地类别	D 类	
	高度	中层（4-7 层）	
	θ_{max} 限值	0.0058	0.04
	$PGA_{m,US}$/g	0.21	0.89
	β	0.64	0.64
本文模型	规范年代	2010 版抗规	
	设防烈度	VIII 度（0.2g）[97]	
	场地类别	II 类[98]	
	特征周期/s	0.35-0.45	
	混凝土强度	C30-C50	
	层数	4-7	
	结构高度/m	14.4-25.2	
	底层柱率	0.005-0.04	
	β	0.4	0.4

美国 ASCE 7 -16 规范规定，框架结构的基本自振周期，可采用式（15）估算：

$$T_1 = 0.02h^{0.75} \tag{15}$$

式中，h 为结构高度。此外，该规范又指出对于不超过 12 层，且每层层高大于 3 m 且满足前面规定的条件的框架，基本自振周期的经验公式除了用式(7)计算外也可以用式（16）：

$$T_1 = 0.1n \tag{16}$$

式中，n 为结构层数。阎红霞等[99]研究发现，相较于式（15），式（16）计算结果与结构实际基本周期误差较小，且本节所建立样本原型结构皆为不超过 12 层，且每层层高大于 3 m 的框架结构，因此本文采用式（16）来对样本原型结构基本周期进行拟合计算。

当结构的基本周期为 $T_g<T_1<5T_g$ 时，从 $S_{am}(T_1)$转化为 $PGA_{m,CN}$ 可按式（17）：

$$PGA_m = \left(\frac{T_g}{T}\right)^{\gamma} \frac{2.25}{S_{am}(T_1)}, T_g < T_1 < 5T_g \tag{17}$$

当结构的基本周期为 $0.1<T_1<T_g$ 时，从 $S_{am}(T_1)$转化为 $PGA_{m,CN}$ 可按式（18）：

$$PGA_m = \eta_2 \frac{2.25}{S_{am}(T_1)}, 0.1 < T_1 < T_g \tag{18}$$

式中：η_2 取值为 1；γ 取值为 0.9。

此外，HAZ-China[100]、震防中心等也给出了适用于中国 RC 框架结构的地震易损性矩阵，如下表 5、表 6 所示。

表 5 适用于中国 RC 框架结构的地震易损性矩阵（HAZ-China）

Table 5 Seismic Fragility matrix for Chinese RC frame structures（HAZ-China）

烈度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
VI	99.63	0.37	0	0	0
VII	88.44	11.22	0.34	0	0
VIII	32.5	55.94	0.80	0.68	0
IX	1.11	34.55	48.88	14.69	0.76
X	0	1.97	17.3	58.51	22.21

表 6 适用于中国 RC 框架结构的地震易损性矩阵（震防中心）

Table 6 Seismic Fragility matrix for Chinese RC frame structures（CEDPC）

烈度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
VI	68.5	22.3	6.2	2.4	0.6
VII	49.2	29.1	11.9	7.1	2.7
VIII	30.7	27.9	21.8	12.9	6.7
IX	15.4	25.4	24.8	19.2	15.3
X	5.8	10.4	26.7	25.3	31.8

经过拟合，可求得 HAZ-China 建议的 RC 框架结构在中等破坏状态下 50%超越概率对应的地面峰值加速度取值 $PGA_{m,HC}$ 为 0.507g，β 为 0.459，毁坏破坏状态下的 $PGA_{m,HC}$ 为 1.69 g，β 为 0.435；经过拟合，可求得震防中心建议的 RC 框架结构

在中等破坏状态下 50%超越概率对应的地面峰值加速度取值 $PGA_{m,CE}$ 为 0.431g，β 为 1.242，毁坏破坏状态下的 $PGA_{m,CE}$ 为 1.903 g，β 为 1.338

Moderate-Code 等级下中层 RC 框架结构中等（DS2）和毁坏（DS4）两个破坏等级本文模型给出的易损性曲线与 HAZUS 软件提供的地震易损性曲线及 HAZ-China、震防中心震害矩阵拟合的易损性曲线相对比结果分别如图 18、图 19 所示。

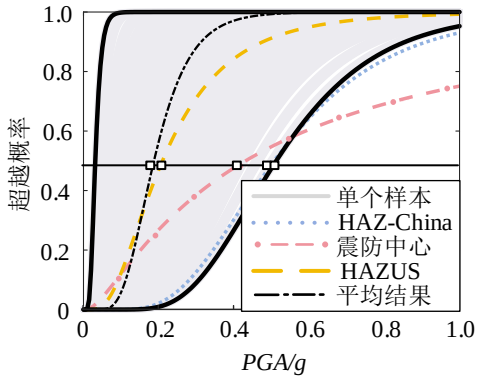


图 18 中等破坏等级易损性曲线对比

Fig.18 Comparison of DS2 fragility curves

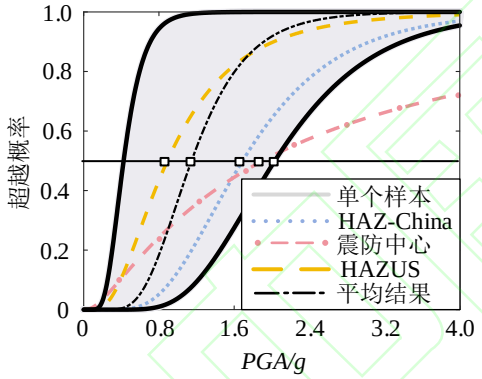


图 19 毁坏破坏等级易损性曲线对比

Fig.19 Comparison of DS4 fragility curves

图 18、图 19 中，在中等破坏（DS2）与毁坏（DS4）破坏等级下，本文拟合 PGA_m 取值的下限值、上限值、与 HAZUS 给出的 $PGA_{m,US}$ 取值及 HAZ-China、震防中心震害矩阵拟合的 $PGA_{m,CN}$ 最似值的工程参数如下表 7、表 8 所示。

表 7 中层 RC 结构在软件模型中与本文模型中的拟合结果对比

Table 7 Comparison of the fitting results of mid-rise RC structures between HAZUS（HAZ-China、CEDPC） and this paper

	中等破坏					
	下限	上限	最似 $PGA_{m,HC}$	最似 $PGA_{m,CE}$	最似 $PGA_{m,US}$	拟合均值
特征周期/s	0.45	0.35	0.35	0.35	0.4	
混凝土强度	C50	C50	C50	C50	C35	
层数	6	4	5	7	5	/
结构高度/m	21.6	14.4	14.4	25.2	18	
底层柱率	0.005	0.04	0.04	0.0058	0.035	
$S_{am}(T_1)/g$	0.536	1.010	1.010	0.512	0.381	0.32
PGA_m/g	0.054	0.513	0.513	0.430	0.210	0.18

表 8 中层 RC 结构在软件模型中与本文模型中的拟合结果对比

Table 8 Comparison of the fitting results of mid-rise RC structures between HAZUS（HAZ-China、CEDPC） and this paper

	毁坏					
	下限	上限	最似 $PGA_{m,HC}$	最似 $PGA_{m,CE}$	最似 $PGA_{m,US}$	拟合均值
特征周期/s	0.35	0.35	0.45	0.35	0.4	
混凝土强度	C40	C50	C30	C30	C35	
层数	4	7	6	4	4	/
结构高度/m	14.4	25.2	21.6	14.4	14.4	
底层柱率	0.005	0.04	0.04	0.04	0.02	
$S_{am}(T_1)/g$	0.865	2.421	2.898	3.735	1.982	1.93
PGA_m/g	0.439	2.033	1.689	1.895	0.892	1.14

以 HAZUS 典型框架结构为例，本研究表明：在中等破坏状态下，基于机器学习建立的模型所得 PGA_m 值域为 0.054g-0.513g（均值 0.18g）；而在毁坏状态下，相应 PGA_m 值域扩展至 0.439g-2.033g（均值 1.14g）。通过与主流灾害评估模型的对比分析发现：从曲线范围来看，相比于灾害评估软件给出的一条易损性曲线，本文拟合结果对应的是一片区域，结果更为宽泛；从曲线形状来看，相较于我国震害评估所采用的震害矩阵，无论是中等破坏等级还是毁坏破坏等级下本文平均拟合 PGA_m 值均远小于 HAZ-China 及震防中心震害矩阵拟合的值，相较于 HAZUS 软件，中等破坏等级下本文平均拟合 PGA_m 值约等于 HAZUS 软件中的建议取值，毁坏破坏等级下本文平均拟合 PGA_m 值则明显大于 HAZUS 软件中的建议取值，且 HAZUS 软件及 HAZ-China 给出的 $PGA_{m,US}$ 及 $PGA_{m,HC}$ 值均落在本文模型给出的 PGA_m 范围

内，说明本文拟合结果与灾害评估软件建议结果还是有所共性，具有一定可信性。此外，HAZUS 及震防中心模型的对数标准差 β 显著大于本研究统计结果，导致其易损性曲线更倾斜；而 HAZ-China 模型的 β 分布与本研究成果较为接近。

对于本文拟合范围的上限及下限 PGA_m 取值，由于合群样本特征分布的不均匀性对机器学习在个别特征取值上造成的影响以及地震动强度指标换算造成的误差，并没有严格按照参数在总体上与输出结果的相关性排列。

造成以上差异的主要原因可能有以下几点：1) 本文的易损性曲线基于单体结构的有限元分析，而 HAZUS 则是基于群体结构的反应谱方法与专家经验确定；HAZ-China 及震防中心矩阵则是通过震害矩阵来进行计算。2) 本文机器学习模型具有更高维度的精确输入，而 HAZUS 模型仅在结构层数、高度、规范等级等参数上做了区分，HAZ-China 及震防中心模型更是只给出了 RC 框架结构的通用震害矩阵。

可见，相较于本文所给曲线，我国现行震害矩阵可能存在抗震能力高估倾向；HAZUS 模型在毁坏状态的超越概率预测更趋保守，与 ELLINGWOOD 等[101]的研究结果较一致：HAZUS 提供的地震易损性曲线在毁坏状态下的破坏超越概率更加保守，所提供的易损性曲线对数标准差更大。传统模型更适用于区域级快速评估，而本研究所建立的机器学习模型能在单体结构层面对地震响应实现更高精度描述，为精细化灾评提供技术支撑。

3.3 可视化程序开发与应用

基于上述内容，开发了如下图20所示的可清洗和快速生成 RC 框架易损性曲线的可视化程序：对于给定易损性曲线，可快速判断该曲线是否可信，并将可信的易损性曲线样本保存到合群样本中，不可信的样本给出修正结果。对于已有的 RC 框架结构，输入其参数信息，即可快速生成该结构可信度较高的易损性曲线，并应用于陕西省地震局的精细化灾害评估项目中。

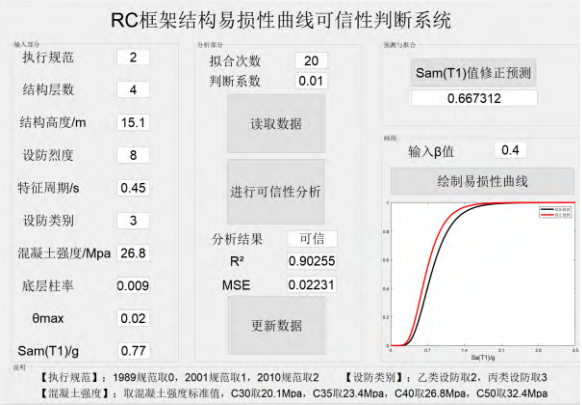


图 20 RC 框架结构易损性曲线可信性判断及预测程序

Fig.20 Credibility assessment and prediction program for fragility curves of RC frame structures

4 结论与展望

基于中文文献中 RC 框架结构易损性曲线繁多、分散、孤立且缺乏高质量的实际震害数据和整体结构破坏性实验数据验证的现状，本文提出一种基于机器学习模型的易损性曲线数据清洗方法，首先收集了近年来中文文献中 RC 框架结构地震易损性曲线作为分析样本并建立数据库，以原型结构的关键参数作为特征，易损性曲线 50% 超越概率对应的谱加速度 $S_{am}(T_1)$作为标签，利用机器学习模型建立结构关键参数与易损性参数之间的映射，通过敏感性分析识别数据库中的离群与合群样本，从而评估数据库中易损性曲线的可信性；最后以 HAZUS 中的典型 RC 框架结构为例，将本文模型拟合的易损性曲线与以 HAZUS、HAZ-China 及震防中心震害矩阵为代表的灾害评估模型提供的易损性曲线进行对比。并基于研究内容，开发了可判断给定曲线可信性及快速生成给定 RC 框架结构易损性曲线的可视化程序。

通过本文研究，可得到以下结论：

（1）目前中文文献中针对我国钢筋混凝土框架结构地震易损性的研究较多地关注采用 2010 版抗震规范设计的 7、8 度设防 II 类场地上的多层建筑，且较多地关注毁坏状态对应的易损性；数据库中样本的一些关键特征的分布呈现较明显的不均匀性；

（2）我国现行中文文献计算的 RC 框架结构易损性曲线大部分是可信的。离群样本 $S_{am}(T_1)$计算结果较合群样本偏大，合群样本的易损性曲线

对应的 $S_{am}(T_1)$都小于 4g；关键工程参数的重要性从大到小依次为柱率、结构层数、结构高度、设防烈度、设防类别、特征周期、混凝土强度和设计所执行的规范版本；

（3）相同结构下相较于目前应用的灾害评估软件给出的易损性曲线，本文模型拟合的易损性曲线具有一定的差异性，且在参数维度与样本覆盖度上具有更准确的描述能力，更适用于单体结构及区域化的精细评估。

本文仅考虑了工程参数及层间位移角对结构易损性曲线的影响，忽略了其它有限元分析中可能会影响易损性分析结果的非工程参数（材料本构的选取、模型维度的选取等）[102-108]；此外，样本数据分布较不均匀，这可能降低机器学习模型的准确性和泛化能力。

本研究提供了一个开源的数据库和一套完整的 RC 建筑易损性清洗流程，目前主要聚焦中文文献，后续可以增广新发表文献、英文文献进入数据库，使得网络更加普适；同时，后续可针对样本不均问题进行优化研究从而提高机器学习的准确性及泛化能力[109]，进而推动更精细化的区域建筑震灾风险评估。

参考文献

[1] 熊政辉. 面向地震保险的巨灾模型研究与应用[D], 北京, 中国地震局工程力学研究, 2019.
XIONG Zhenghui. The study and application of catastrophe model for earthquake insurance[D], Beijing. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese).

[2] 钟江荣，张令心，沈俊凯. 基于震害资料的云南地区砌体结构易损性研究[J]. 华南地震，2021，41(01)：108-16.
ZHONG Jiangrong, Zhang Lingxin, Shen Junkai. Study on vulnerability of masonry structure in Yunnan based on seismic damage data[J]. South China Journal of Seismology, 2021, 41(01): 108-16 (in Chinese).

[3] 代旷宇, 于晓辉, 吕大刚. 钢筋混凝土柱的易损性函数研究 [J]. 工程力学, 2024,41(01):219-228.
DAI Kuangyu, YU Xiaohui, LU Dagang. Fragility functions for reinforced concrete columns [J]. Engineering Mechanics, 2024,41(01):219-228 (in Chinese).

[4] 尹之潜. 结构易损性分类和未来地震灾害估计 [J]. 中国地震, 1996, (01): 49-55.
YIN Zhiqian, Structural vulnerability classification and future seismic hazard estimation[J]. Earthquake Research in China, 1996, (01): 49-55.

[5] ROSSETTO T, ELNASHAI A. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data [J]. Engineering structures, 2003, 25(10): 1241-63.

[6] FEMA P-58-6: Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Buildings [R], 2018.

[7] 吕大刚, 于晓辉. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险理论研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 41-8.
LU Dagang, YU Xiaohui. Theoretical study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 41-8 (in Chinese).

[8] 于晓辉, 吕大刚. 基于地震易损性解析函数的概率地震风险应用研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 49-56. YU Xiaohui, LU Dagang. Application study of probabilistic seismic risk assessment based on analytical functions of seismic fragility [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 49-56 (in Chinese).

[9] 吴巧云, 朱宏平, 樊剑. 基于性能的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析 [J]. 工程力学, 2012, 29(09): 117-24. WU Qiaoyun, ZHU Hongping, FAN Jian. Performance-based seismic fragility analysis of rc frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(09): 117-24 (in Chinese).

[10] 张令心, 江近仁, 刘洁平. 多层住宅砖房的地震易损性分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, (01): 49-55.
ZHANG Lingxin, JIANG Jinren, LIU Jieping. Seismic vulnerability analysis of mutistory dwelling brick buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics. 2002, (01): 49-55 (in Chinese).

[11] 郑山锁, 田进, 韩言召, 等. 考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析 [J]. 地震工程学报, 2014, 36(01): 1-6.
ZHENG Shansuo, TIAN Jin, HAN Yazhao, et al. Seismic fragility analysis of steel structure considering steel corrosion [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(01): 1-6 (in Chinese).

[12] 党争, 梁兴文, 党王桢, 等. 纤维增强混凝土框架-剪力墙结构地震反应及易损性分析 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 54-64.
DANG Zheng, LIANG Xingwen, DANG Yuzhen, et al. Seismic response and fragility analysis of fiber-reinforced concrete frame-shear wall structure [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 54-64 (in Chinese).

[13] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(05): 19-25.
LU Xilin, SU Ningfen, ZHOU Ying. IDA-based seismic fragility analysis of a complex high-rise structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics. 2012, 32(05): 19-25 (in Chinese).

[14] 何益斌, 李艳, 沈蒲生. 基于性能的高层混合结构地震易损性分析 [J]. 工程力学, 2013, 30(08): 142-7+62.
HE Yibin, LI Yan, SHEN Pusheng. Performance-based seismic fragility analysis of tall hybrid structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(08): 142-7+62 (in Chinese).

[15] 吕晓寅, 刘书壮, 李超慧, 等. 中小型铁路客站钢网架-混凝土框架混合结构体系地震易损性研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 85-92.
LU Xiaoyin, LIU Shuzhuang, LI Chaohui, et al. Seismic fragility analysis of steel latticed roof-concrete frame structure of small and medium sized railway passenger station [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 85-92 (in Chinese).

[16] 陆祝贤, 吴轶, 杨春, 等. 基于 IDA 的阀厅结构地震易损性分析 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(S1): 263-7.
LU Zhuxian, WU Yi, YANG Chun, et al. Seismic fragility analysis of valve hall structure based on IDA [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S1): 263-7 (in Chinese).

[17] 文波, 牛荻涛. 大型变电站主厂房地震易损性研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(02): 19-23.
WEN Bo, NIU Ditao. Seismic vulnerability analysis for the main building of the large substation [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(02): 19-23 (in Chinese).

[18] 岳庆霞, 叶列平, 陆新征. 土结相互作用对框架结构倒塌的影响研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(03): 87-92.
YUE Qingxia, YE Lieping, LU Xinzheng. Research on the influence of soil-structure interactionon the collapse of frame structure [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(03): 87-92 (in Chinese).

[19] 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.
YU Xiaohui, LU Dagang. Seismic collapse fragility analysis considering structural uncertainties [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 8-14 (in Chinese).

[20] 李英民, 韩军, 田启祥,等. 填充墙对框架结构抗震性能的影响 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(03): 51-8.
LI Yingmin, HAN Jun, TIAN Qixiang, et al. Study on influence of infilled walls on seismic performance of RC frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2009, 29(03): 51-8 (in Chinese).

[21] VESNA terzic M S, STEPHEN mahin. Uncertainty in Modeling Seismic Response of Reinforced Concrete Bridge Columns [Z]. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering. Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan. 2012

[22] 周洲, 吕大刚, 于晓辉. 基于文献调研的我国建筑结构地震倒塌风险概率评估 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(08): 1-18.
ZHOU Zhou, LU Dagang, YU Xiaohui. Probabilistic assessment of seismic collapse risk for building structures in China based on literature investigation [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(08): 1-18 (in Chinese).

[23] 张令心, 李孟达, 刘洁平, 等. 考虑结构不确定性的框剪结构地震易损性分析 [J]. 自然灾害学报, 2018, 27(04): 112-8.
ZHANG Lingxin, LI Mengda, LIU Jieping, et al. Seismic fragility analysis of frame-shear wall structures considering structural parameter uncertainty [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(04): 112-8 (in Chinese).

[24] 李少泉, 方鄂华. 高层大开间板墙结构弹塑性地震反应 [J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1996, (04): 74-80.
LI Shaoquan, FANG Ehua. Structural vulnerability classification and future seismic hazard estimation[J].

Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering) ,1996, (04): 74-80. (in Chinese).

[25] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2002, 31(3): 491-514.

[26] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Applied incremental dynamic analysis [J]. Earthquake spectra, 2004, 20(2): 523-53.

[27] CHRISTOVASILIS I P, FILIATRAULT A, Constantinou M C, et al. Incremental dynamic analysis of woodframe buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009, 38(4): 477-96.

[28] HE Xiangdong, LU Zheng. Seismic fragility assessment of a super tall building with hybrid control strategy using IDA method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 278-91.

[29] 梁丹, 梁兴文. 按现行规范设计的Ⅷ度区 RC 框架结构的倒塌性能评估 [J]. 地震工程学报, 2015, 37(04): 1060-5+72.

LIANG Dan, LIANG Xingwen. Collapse performance evaluation of reinforced concrete frame structures in seismic-intensity-8 zone designed using current codes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(04): 1060-5+72 (in Chinese).

[30] 罗文文, 李英民, 韩军, 等. 不同倒塌判定准则对评价 RC 框架结构抗倒塌能力的影响 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(S2): 241-6.

LUO Wenwen, LI Yingmin, Jun, et al. Study on the effect of different collapse criteria on evaluating the collapse-resistant capacity of RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S2): 241-6 (in Chinese).

[31] 吴谓. 不同抗震设防 RC 框架结构医疗建筑抗震韧性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

WU wei. Study on the seismic resilience of RC medical frame buildings with different seismic fortification levels [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020 (in Chinese).

[32] 王洋. 不同算法的钢筋混凝土框架结构地震易损性对比分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

WANG Yang. Seismic fragility analysis and comparison of reinforced concrete frame structures with different algorithms [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).

[33] 杨军平. 大震作用下考虑退化特性的 RC 框架结构抗整体性倒塌能力分析评估 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.

YANG Junping. Investigation on global collapse resistance of RC frame subjected to severe earthquake considering deterioration characteristic [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012 (in Chinese).

[34] 周明军. 带薄弱层的框架—填充墙结构易损性分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.

ZHOU Mingjun. Vulnerability analysis of infill frame with weak layer [D]. Nanning: Guangxi University, 2017 (in Chinese).

[35] 高龙. 单跨钢筋混凝土框架结构的抗地震倒塌分析研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.

GAO Long. Study on seismic collapse analysis of single-bay RC frame structure [D] .Chongqing: Chongqing University, 2019 (in Chinese).

[36] 杨硕. 非住宅类 RC 框架结构地震易损性分析混合方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.

YANG Shuo. Study on a hybird method for seismic vulnerability analysis of nonresidential RC frame structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016 (in Chinese).

[37] 于晓辉. 钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

YU Xiaohui. Probabilistic seimic fragility and risk analysis of reinforced concrete frame structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).

[38] 卞荣燕. 钢筋混凝土框架结构的增量动力分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.

BIAN Rongyan. Incremental dynamic analysis of the reinforced concrete frame structure [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2010 (in Chinese).

[39] 李玉. 钢筋混凝土框架结构基于 IDA 方法的易损性分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

LI Yu. Seismic fragility analysis of reinforced concrete frame structures based on the IDA method [D]. Xi'an : Xi'an University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese).

[40] 蒋伟. 基于不同设计标准的 RC 框架结构地震易损性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
JIANG Wei. Seismic fragility analysis of rc frame structures based on different designed standards [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese).

[41] 薛晓娜, 许卫晓, 杨伟松, 等. 基于多性态需求的 RC 框架-翼墙结构抗震性能分析 [J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(05): 67-75+150.
XUE Xiaona, XU Weixiao, YANG Weisong, et al. Seismic performance analysis of RC frame wing wall structure based on multi-behavior requirement [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(05): 67-75+150 (in Chinese).

[42] 程扬. 基于多性态需求的 RC 框架结构抗震韧性提升与评估 [D] 青岛:青岛理工大学, 2021.
CHENG Yang. Enhancement and evaluation of seismic resilience of rc frame structures based on multiple demands [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021 (in Chinese).

[43] 张明远. 基于构件性能的填充墙框架结构地震易损性研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.
ZHANG Mingyuan. Components performance-based seismic vulnerability analysis of masonry infilled frame structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017 (in Chinese).

[44] 王经纬. 基于模态增量动力分析的钢筋混凝土框架结构抗震性能评估 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
WANG Jingwei. Seismic performance evaluation of reinforced concrete frame based on modal incremental dynamic analysis [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016 (in Chinese).

[45] 王中阳. 基于能量方法设计的 RC 框架结构易损性分析 [D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
WANG Zhongyang. seismic fragility analysis of rc frame structure based on energy balance [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018 (in Chinese).

[46] 杨作续. 基于拟力法的增量动力分析方法的研究及其应用 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2018.
YANG Zuoxu. Study and application of incremental dynamic analysis method based on force analogy method[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2018. (in Chinese).

[47] 孙力宇. 基于三种数值模型的钢筋混凝土框架结构地震易损性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
SUN Liyu. Research framework on the seismic fragility of structures based on three reinforced concrete numerical models[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese).

[48] 张渝昊. 基于新型地震动强度指标的 RC 框架结构地震易损性研究 [D]; 贵州大学, 2022.
ZHANG Yuhao. Seismic vulnerability study of RC frame structures based on new ground motion intensity measures[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022. (in Chinese).

[49] 徐积刚. 基于性能的既有 RC 框架抗震恢复性评估与提升方法研究 [D]. 南京:东南大学, 2020.
XU Jigang. performance-based seismic resilience assessment and improvement of rc frame structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2020 (in Chinese).

[50] 杨溥, 何承华. 基于性能设计的钢筋混凝土框架结构易损性分析 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(S1): 63-8.
YANG Fu, He Chenghua. Seismic vulnerability analysis of RC moment resisting frames complied with requirements of different performance in current seismic code [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 63-8 (in Chinese).

[51] 范留涛. 基于易损性的钢筋混凝土框架抗震韧性定量分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
FAN Liutao. Quantitative analysis of seismic resilience of reinforced concrete frames based on vulnerability [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020 (in Chinese).

[52] 于晓辉, 吕大刚, 范峰. 基于易损性指数的钢筋混凝土框架结构地震损伤评估 [J]. 工程力学, 2017, 34(01): 69-75+100.
YU Xiaohui, Lu Dagang, Fan Feng. Seismic damage assessment of rc frame structures based on vulnerabilty index [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(01): 69-75+100 (in Chinese).

[53] 刘慧杰. 基于增量动力分析的 RC 框架结构地震易损性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
LIU Huijie. Research on seismic vulnerability of RC frame structure based on incremental dynamic analysis [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (in Chinese).

[54] 王涵平. 基于 IDA 的无粘结预应力装配式框架结构地震易损性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
WANG Hanping. Seismic fragility analysis of precast prestressed frame structures with unbound tendons [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016 (in Chinese).

[55] 王璐. 基于 IDA 的新型地震动强度指标有效性研究及结构地震易损性分析 [D].兰州: 兰州理工大学, 2020.
WANG Lu. Investigation on efficiency of new ground motion intensity measures and seismic fragility analysis of structures based on IDA [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016 (in Chinese).

[56] 任浩, 田勤虎, 张炜超, 等. 基于 IDA 方法的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析 [J]. 建筑结构, 2019, 49(S2): 350-5.
REN Hao, TIAN Qinhu, ZHANG Weichao, et al. Seismic fragility analysis of reinforced concrete frame structures based on IDA method [J]. Building Structure, 2019, 49(S2): 350-5 (in Chinese).

[57] 杨坤. 基于 IDA 方法的 RC 框架结构倒塌与残余位移分析 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
YANG Kun. Analysis of RC frame structure collapse and residual displacement based on IDA method [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).

[58] 李文博. 基于 IDA 方法的 RC 框架结构地震易损性分析研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
LI Wenbo. Study on seismic fragility analysis of RC frame structures based on the IDA method [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012 (in Chinese).

[59] 韩建平, 杜少卿. 既有低延性钢筋混凝土框架结构抗整体倒塌能力评估 [J]. 结构工程师, 2018, 34(06): 59-64.
HAN Jianping, DU Shaoqing. Investigation on global collapse resistance capacity of in-service low-ductile RC frame structures [J]. Structural Engineers, 2018, 34(06): 59-64 (in Chinese).

[60] 温卫平, 籍多发, 刘惠华, 等. 考虑倒塌储备的近断层区域 RC 框架结构抗震设计方法 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(04): 1-7.
WEN Weiping, JI Duofa, LIU Huihua, et al. Seismic design method of RC frame structures at near-fault region considering collapse margin [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(04): 1-7 (in Chinese).

[61] 刘惠华. 考虑近场效应的钢筋混凝土框架结构抗震设计方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LIU Huihua. Seismic design method of reinforcement concrete frame structures considering near-field effects [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).

[62] 闫清萱. 考虑主余震效应的 RC 框架结构抗震韧性评估 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
YAN Qingxuan. Seismic resilience assessment of RC frame structure considering mainshock- aftershock effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021 (in Chinese).

[63] 邓夕胜, 蒋红雨, 杨海军. 配置高强钢筋混凝土框架结构的地震易损性分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(03): 205-13.
DENG Xisheng, Jiang Hongyu, Yang Haijun. Seismic vulnerability analysis of high strength reinforced concrete frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(03): 205-13 (in Chinese).

[64] 徐刚, 李爱群, 陈素芳. 山地掉层框架结构地震易损性分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(03): 341-7.
XU Gang, LI Aiqun, CHEN Sufang. Seismic vulnerability analysis of moment Frames supported by stepped foundation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(03): 341-7 (in Chinese).

[65] 苗雨顺. 设防烈度对既有 RC 框架结构抗震性能影响及加固方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
MIAO Yushun. Research on seismic performance affected by fortification intensity and reinforced methods of existing RC frame structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).

[66] 郑捷, 左河山, 李文博, 等. 设计因素对 RC 框架结构地震易损性的影响 [J]. 地震工程学报, 2016, 38(04): 491-7+524.
ZHENG Jie, ZUO Shanhe, LI Wenbo, et al. Influence of design factors on seismic fragility of RC frame

structures [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(04): 491-7+524 (in Chinese).

[67] 陈挚. 填充墙 RC 框架结构地震易损性分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
CHEN Zhi. Seismic fragility analysis of RC frame structures with infill walls [D]. Nanning: Guangxi University, 2017 (in Chinese).

[68] 杨希. 弯矩增大系数对 RC 框架结构抗震性能影响研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
YANG Xi. Influences of moment magnifying coefficient on seismic performance of RC frame structures [D]. Xi'an : Xi'an University of Architecture and Technology, 2016 (in Chinese).

[69] 贺若桓. 乙类与丙类 RC 框架结构抗倒塌性能分析 [D].包头: 内蒙古科技大学, 2020.
HE Ruohuan. Analysis of collapse resistance performance of type B and type C RC frame structures. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020 (in Chinese).

[70] 刘派. 中小学建筑钢筋混凝土框架结构抗震性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
LIU Pai. Study on seismic behavior of reinforced concrete frame structures for primary and middle school [D]. Xi'an : Xi'an University of Architecture and Technology, 2011 (in Chinese).

[71] 程曦. 主余震作用下 RC 框架结构的易损性及经济损失评估 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
CHENG Xi. The fragilityand economicloss estimation of RC frame structure subjected to mainshock-aftershock sequences [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).

[72] 张浩. 柱端弯矩增大系数对 RC 框架结构抗震性能影响 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.
ZHANG Hao. The effect of column-to-beam strength ratio on seismic performance of RC frame structure [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019 (in Chinese).

[73] ZHANG Y, OUYANG X, SUN B, et al. A comparative study on seismic fragility analysis of RC frame structures with consideration of modeling uncertainty under far-field and near-field ground motion excitation [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022: 1-33.

[74] ZHANG Y, SHI Y, SUN B, et al. Estimation of aleatory randomness by Sa(T_1)-based intensity measures in fragility analysis of reinforced concrete frame structures [J]. CMES-Comput Model Eng Sci, 2022, 130: 73-96.

[75] FENG D C, CAO X Y, WANG D, et al. A PDEM-based non-parametric seismic fragility assessment method for RC structures under non-stationary ground motions [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63: 105465.

[76] WU Q Y, ZHU H P, FAN J. Performance-based seismic financial risk assessment of reinforced concrete frame structures [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(5): 1425-36.

[77] 宋文斌. RC 框架地震易损性及抗倒塌能力研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
SONG Wernbin. Research on seismic vulnerability and collapse resistance of RC frame [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020 (in Chinese).

[78] 党王桢, 梁兴文. RC 框架结构地震倒塌易损性分析的实用方法 [J]. 震灾防御技术, 2015, 10(04): 986-95.
DANG Yuzhen, LIANG Xingwen. The practical method of collapse fragility analysis of RC frame structure [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(04): 986-95 (in Chinese).

[79] 杨威. RC 框架结构地震易损性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
YANG Wei. Study on the seismic fragility of RC frame structures [D]. Xi'an : Xi'an University of Architecture and Technology, 2016 (in Chinese).

[80] 杜晓菊. RC 框架结构基于损伤的抗震性能评估方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
DU Xiaoju. Methodology research on seismic performance assessment based on damage for RC frame structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).

[81] 陈冠君. RC 框架结构基于性态水准的抗震设计方法 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
CHEN Guanjun. Seismic design method of RC frame structure based on behavior level [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021 (in Chinese).

[82] WU D, Tesfamariam S, Stiemer S, et al. Seismic fragility assessment of RC frame structure designed according to modern Chinese code for seismic design of

buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 11: 331-42.

[83] WANG S, LI X, ZHANG J. Seismic loss risk assessment of RC frame structures designed according to Chinese code [J]. Earthquakes and Structures, 2021, 20(5): 571.

[84] WANG Q W, SHI Q X, MEN J J. Seismic Performance Evaluation of SRC Frames Based on Incremental Dynamic Analysis [J]. Advanced Materials Research, 2011, 163: 4331-5.

[85] HUANG W, SHI F, ZHANG C, et al. Seismic performance of reinforced concrete frame with lead viscoelastic damper under mainshock-aftershock sequences; proceedings of the Structures, F, 2022 [C]. Elsevier.

[86] YU X H, DAI K Y, LI Y S, et al. Seismic resilience assessment of corroded reinforced concrete structures designed to the Chinese codes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 20: 303-16.

[87] 黄帅.考虑地震动特性的RC框架结构地震易损性分析 [D]. 长沙: 湖南大学,2021.

HUANG Shuai. Research on seismic fragility of RC Frame structure with considering seismic motion characteristics [D]. Changsha: Hunan University, 2021 (in Chinese).

[88] GBJ 11-1989 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989.

GBJ 11-1989 Code for seismic design of buildings ［S］. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989 (in Chinese)

[89] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.

GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese)

[90] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese)

[91] GB 50352—2005 民用建筑设计通则 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

GB 50352—2005 Code for design of civil buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese)

[92] HASSOUN M H. Fundamentals of artificial neural networks [M]. MIT press, 1995.

[93] HEARST M A, DUMAIS S T, OSUNA E, et al. Support vector machines [J]. IEEE Intelligent Systems and their applications, 1998, 13(4): 18-28.

[94] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions [J]. Advances in neural information processing systems, 2017, 30.

[95] MR H M. Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model [J]. Department of Homeland Security, FEMA, Washington, DC, 2003: 235-60.

[96] ASCE 7-16: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures [S]. 2017:

[97] LI S B, XIE L L, GONG M S, et al. Performance-based methodology for assessing seismic vulnerability and capacity of buildings [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2010, 9: 157-65.

[98] 周健, 李小军, 李亚琦, 等. 中美建筑抗震设计规范中工程场地类别的对比和换算关系 [J]. 地震学报, 2021, 43(04): 521-32+34.

ZHOU Jian, LI Xiaojun, LI Yaqi, et al. Comparative analysis and transformation relations betweenChina and the US site classification systems inbuilding seismic code provisions [J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, 43(04): 521-32+34 (in Chinese).

[99] 阎红霞, 杨庆山, 秦敬伟, 等. 各国规范中 RC 框架自振周期的对比和探讨 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(11): 108-13.

YAN Hongxia, YANG Qingshan, QIN Jingwei, et al. Comparison and comment for computing natural vibration period of RC frames in codes of some countries [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(11): 108-13 (in Chinese).

[100] 陈洪富. HAZ-China 地震灾害损失评估系统设计及初步实现 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.

CHEN Hongfu. Gneneral develop,emt amd design of HAZ-China earthquake disater loss estimation system [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012 (in Chinese).

[101] ELLINGWOOD B R, CELIK O C, KINALI K. Fragility assessment of building structural systems in Mid - America [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1935-52

[102] 刘亦恒,胡进军,刘巴黎.面向 RC 框架结构地震易损性分析的地震动不确定性评估与优化方法 [J].工程力学,1-13.
LIU Yiheng, HU Jinjun, LIU Bali. Uncertainty evaluation and optimization method of ground motion for seismic fragility analysis of rc frame structures [J]. Engineering Mechanics, 1-13 (in Chinese).

[103] 卢啸,孙伟豪. 带摩擦型自复位节点的混凝土框架结构地震响应与易损性研究 [J].工程力学,1-10.
LU Xiao, SUN Weihao. Study on seismic response and vulnerability of concrete frames with frictional self-centering joints [J]. Engineering Mechanics, 1-10 (in Chinese).

[104] 周洲,于晓辉,吕大刚等. 钢筋锈蚀与余震对 RC 框架结构地震损伤与易损性的影响分析 [J]. 工程力学,2023,40(09):203-213+256.
ZHOU Zhou, YU Xiaohui, LU Dagang, et al. A fragility analysis framework for rc frame buildings subjected to mainshock-aftershock sequences considering multiple damage indicators [J]. Engineering Mechanics, 2023,40(09):203-213+256. (in Chinese).

[105] 高永武;王东明;陈敬一. 考虑场地效应地震动确定方法对结构地震易损性的影响研究 [J].工程力学, 2025,42(04):139-149.
GAO Yongwu, WANG Dongming, Chen Jingyi. Influence of probabilistic seismic vulnerability analysis on ground motion determination method with considering site effect [J]. Engineering Mechanics, 2025,42(04):139-149. (in Chinese).

[106] CHENG L, LI J B, ZHOU L, et al. Fragility analysis of nuclear power plant structure under real and spectrum-compatible seismic waves considering soil-structure interaction effect [J]. Engineering Structures, 2023, 280: 115684.

[107] D'ARAGONA M G, POLESE M, PROTA A. Seismic fragility curves for infilled RC building classes considering multiple sources of uncertainty[J]. Engineering Structures, 2024, 321: 118888.

[108] YURDAKUL Ö, DEL VECCHIO C, DI LUDOVICO M, et al. Fragility functions for fiber-reinforced polymers strengthened reinforced concrete beam-column joints[J]. Engineering Structures, 2023, 279: 115570.

[109] FEI Y, LIAO W, LU X, et al. Semi-supervised learning method incorporating structural optimization for shear-wall structure design using small and long-tailed datasets[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107873.