

公路桥梁地震易损性分析的研究综述与展望

吴文朋^{1,2,3}, 李立峰², 胡思聪², 徐卓君²

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 工程结构动力学与可靠性分析湖南省高等学校重点实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 为了促进桥梁结构地震易损性分析在我国的发展和应用, 详细论述了公路桥梁地震易损性分析方法在国内外的研究现状、存在的问题和发展方向。首先, 对国内外常用的桥梁地震易损性分析方法进行分类, 归纳了每种方法的适用性, 总结了桥梁地震易损性研究在我国的发展历程和研究现状; 其次, 根据采用的参数估计方法的不同, 将理论地震易损性函数分为四种类型, 介绍了每种易损性函数的建立过程和优缺点。最后, 指出了该领域尚且存在的一些问题和有待研究的方向。研究表明, 易损性分析能很好地考虑桥梁抗震设计中存在的不确定性问题, 对基于性能桥梁抗震设计的发展具有重要的意义。

关键词: 桥梁工程; 地震; 易损性分析; 不确定性; 分析方法

中图分类号: U442.55

文献标志码: A

Research review and future prospect of the seismic fragility analysis for the highway bridges

WU Wenpeng^{1,2,3}, LI Lifeng², HU Sicong², XU Zhuojun²

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. College of Civil Engineering,

Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Key Laboratory of Dynamics and Reliability of Structures, College of

Hunan Province, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: To improve the development and application of the seismic fragility analysis for the highway bridges in China, the research status of the fragility analysis methods, the issues that still unsolved and the potential directions for future research were summarized in detail. Firstly, the fragility analysis methods which were widely adopted around the world were classified, in order to conclude the applicability of each method. Meanwhile, the development process and research status of the bridge fragility analysis in China were summed up. Then, based on the difference of the statistical methods, the theoretical fragility functions were categorized into four types. The development process, as well as the merit and demerit of each fragility function, were introduced in this study. Finally, the unsolved problems and the future investigation directions in this research field were indicated. It is concluded that the fragility analysis method can account for the uncertainty issues incorporated in seismic design of the bridges. It is of great significance for the development of the performance-based seismic design of the bridge.

Key words: bridge engineering; earthquake; fragility analysis; uncertainty; analysis method

收稿日期:2016-09-04; 修订日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51278183); 湖南省高等学校重点实验室开放课题(KZ070010101)

Supported by: National Natural Science Foundation of China(51278183); Open Project Program of Key Laboratory, College of Hunan Province (KZ070010101)

作者简介:吴文朋(1985-),男,讲师,博士,主要从事桥梁抗震研究。E-mail: wuwenpeng@xtu.edu.cn

通讯作者:李立峰(1971-),男,教授,博士,主要从事桥梁抗震、大跨新型组合桥梁结构研究。E-mail: lilifeng@hnu.edu.cn

引言

基于性能的抗震设计(PBSD)强调采用合理的抗震性能目标和合适的抗震设防措施进行结构抗震设计,使结构在不同水准地震作用下的破坏和损失都能够为业主所承受,并通过全寿命周期的费用-效益分析使结构安全可靠、经济合理^[1]。目前适用性较强的PBSD方法是由美国太平洋地震工程研究中心(PEER)提出的基于性能的抗震设计方法^[2],该方法以全概率理论作为基础将PBSD分解为4个相互独立的子模块,分别用来量化地震动强度指标(IM)、工程需求参数(EDP)、损伤指标(DM)和决策变量(DV)。地震易损性分析是PBSD的一个重要中间环节,最大的特点是能够同时考虑与IM、EDP和DM相关的不确定性,并量化这些不确定性的影响。

桥梁作为现代化交通运输网络的枢纽工程,不仅是地震发生时灾区人民逃生的安全通道,也是保证震后抢险救灾工作顺利进行的關鍵。由于不同桥梁结构之间的差异性明显,桥梁施工和服役的自然条件往往比较恶劣,各种不确定性因素的影响更加突出。目前国外已经针对不同地区或不同桥型的桥梁分类情况,研究了不确定性在桥梁地震易损性分析过程中的影响^[3-6],这些研究成果不仅能直接用于指导旧桥的抗震加固,还能为新桥的抗震设计提供经验或指导。美国太平洋地震工程研究中心从2007年开始得到加州交通部的资助,展开了针对加州交通系统的抗震研究计划,整个研究计划都是基于全概率抗震设计框架,其最终目标是减少美国加州地区地震灾害对公路、铁路、桥梁和机场等的影响,截至目前为止该计划已经取得了一系列的研究成果^[7-8]。需要指出的是,这些研究成果已经被应用于美国联邦紧急事务署(FEMA)和美国建筑科学研究院(NIBS)联合开发的地震灾害损失风险评估软件(HAZUS),表明桥梁地震易损性研究成果在美国已经可用于指导实际工程的应用。

近年来,我国也正在开发类似的针对我国实际情况的地震灾害损失风险评估软件HAZ-China^[9],地震易损性分析是地震灾害损失风险评估的核心模块。目前,地震易损性研究的核心问题仍然是如何合理地量化各类不确定性的影响。尽管我国学者王光远院士很早就指出不确定性分析在结构抗震评估中的重要性^[10],近年来国内的一些研究也开始在地震易损性分析中考虑不确定性的影响^[11-13]。然而,一方面这些研究的关注对象比较离散;另一方面这些研究只是引入不确定性,却很少对各种不确定性的影响进行定量分析。因此,我国现有的研究成果尚且不能满足实际工程应用的要求。

如何根据我国公路桥梁的实际情况,以基于性能的桥梁抗震设计作为指导,建立能够系统地考虑多种不确定性的桥梁地震易损性分析方法,是当前亟待进一步研究的课题。本文对国内外已有的桥梁地震易损性研究成果进行系统地梳理和综述,归纳出各种分析方法的特点和适用范围,并详细总结了桥梁地震易损性研究在我国的研究现状,指出该领域尚存在的问题以及仍需展开的研究方向,为课题深入研究提供参考和指导。

1 桥梁地震易损性分析方法

结构地震易损性分析描述了结构在地震动作用下的损伤概率与地震动大小之间的关系,也称震害预测。

其研究对象可以是单个结构物或某类结构物(简支梁桥、高层建筑等),也可以是某个区域(城市地区、交通网络等)。易损性指数和易损性函数被认为是地震易损性分析的两种主要表现形式^[14]。易损性指数的计算需要收集大量的历史震害经验数据,其表现形式为破坏概率矩阵(DPM)^[15]。易损性函数是用一个合理的方程来表示结构或构件的地震损伤概率与地震动参数之间的函数关系,其表现形式为一条连续的曲线,如图1所示。

由于DPM不易被非专业人士(业主、决策人)所理解,而易损性曲线在形式上直观、易懂,容易被大众所接受。因此,易损性曲线更受工程师和研究人员的青睐。通常所讲的地

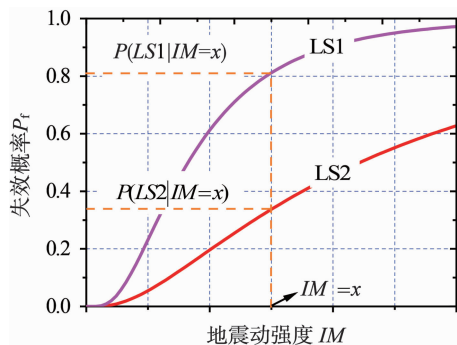


图1 地震易损曲线的定义

Fig. 1 Definition of seismic fragility curves

震易损性分析大多数以易损性曲线为表现形式。易损性曲线的定义:在指定的地震动强度水平下,结构或构件的地震响应超过指定极限状态的条件失效超越概率:

$$P_f = P(R \geq LS | IM = x) \quad (1)$$

式中 P_f 表示结构或构件的失效概率; R 表示结构的地震响应; LS 表示损伤极限状态; IM 表示地震动强度参数; x 表示指定的地震动强度水平。

最早的地震易损性分析可以追溯到 20 世纪 70 年代末,为了评估核电站基础设施在地震作用下的概率风险,当时首次采用概率分析方法对核设施的地震易损性进行了分析^[16],该方法后来被推广到其它基础设施的概率地震风险评估中。直到 20 世纪 80 年代末 90 年代初,易损性分析才开始被用来衡量桥梁的地震损伤与地震动强度间的关系^[17]。根据分析数据的来源不同,既有的桥梁地震易损性分析方法可分为 4 类^[18]: (1) 基于专家意见的易损性分析; (2) 基于震害调查的经验易损性分析; (3) 基于数值模拟的理论易损性分析; (4) 混合易损性分析。

1.1 基于专家意见的易损性分析

基于专家意见的易损性分析,其分析数据是通过收集大量专家对桥梁在不同损伤状态的评估意见得到。美国应用技术协会 (Applied Technology Council, ATC) 20 世纪 80 年代中期发起了 ATC-13 计划^[15],早期的 ATC-13 研究报告中易损性是以 DPM 的形式给出。然而,1991 年发布的 ATC-25^[19] 研究报告中,破坏概率矩阵又被转化为连续形式的易损性曲线。这种方法依赖于专家意见的统计结果,存在较强的主观性。专家意见的反馈率以及桥梁结构形式的分类都对分析结果影响很大,因此该方法的应用已经很少。

1.2 基于震害调查的经验易损性分析

基于震害调查的经验易损性分析,其分析数据来源于同一地区桥梁历史震害调查数据和相应的地震动空间分布信息,主要适合于有较完整的震害调查数据和地震动记录数据的地区,如美国加州地区、日本神户地区和中国西部地区。Basoz 和 Kiremidjian 等人^[20-21] 利用 Loma Prieta 地震 (1989) 以及 Northridge 地震 (1994) 中的桥梁震害数据对加州地区的桥梁,采用逻辑回归分析方法得到了相应的地震易损性曲线。基于日本阪神大地震 (1995) 的桥梁震害调查报告,Shinozuka 和 Yamazaki 等人^[22-23] 建立了该地区桥梁的 DPM,并分别采用极大似然方法和最小二乘方法形成了相应的易损性曲线。陈力波等人^[24] 基于汶川大地震 (2008) 中桥梁震害调查数据,利用极大似然方法对 443 座桥梁的破坏情况进行拟合,建立了整体样本和不同类型桥梁的易损性曲线。经验地震易损性分析方法直接基于地震灾区的桥梁破坏统计数据,分析过程简单明了,建立的地震易损性曲线对于其统计区域的桥梁来说有重大的实用价值。然而,一方面,世界上大部分地区仍缺乏历史震害统计或地震动空间分布信息;另一方面,单一类型的桥梁结构也往往会因为调查样本的不足而影响易损性分析结果的可靠性。因此该方法在使用和推广上也受到了一定的限制。

1.3 基于数值模拟的理论易损性分析

基于数值模拟的理论易损性分析,其分析数据直接来源于理论数值模拟的计算结果,因此,该方法所采用的分析数据是完全可控的,即分析人员可以选择不同数量的地震波或建立不同数量的模型来进行分析。由于具有较好的可控性,该方法已成为目前应用最广泛的易损性分析方法之一。特别是对那些缺乏桥梁震害统计数据或地震动信息的地区,采用基于数值模拟的理论分析方法建立易损性曲线是一个很好的选择。理论地震易损性分析中一般假定结构的抗震能力和地震需求服从对数正态分布,因此,可用标准对数正态累积分布函数来表示地震易损性:

$$P_f = \Phi \left[\frac{\ln(S_d/S_c)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right] \quad (2)$$

式中, S_d 和 S_c 分别表示桥梁结构需求和能力的均值, β_d 和 β_c 则分别表示需求和能力的对数标准差。针对上式,不同学者采用了不同的分析方法建立了桥梁的理论易损性曲线。最早的理论易损性曲线是基于弹性反应谱分析方法, Ouyang 等人^[25] 采用弹性反应谱分析对美国 Kentucky 州高速公路桥梁的地震易损性进行了评价; Jernigan 和 Hwang^[26] 引入地震力系数 (SFF) 来考虑结构地震需求的不确定性,也采用弹性反应谱分析方法对美国中东部地区桥梁进行了地震易损性分析。由于反应谱分析无法预测桥梁结构的各种非线性,一些学者采用静力非线性分析方法 (能力谱方法, CSM) 建立地震易损性曲线, Dutta^[27], Mander 和 Basoz^[28], Shinozuka 等人^[29] 都采用 CSM 方法建立了美国不同地区的桥梁地震易损性曲线。Banerjee 等人的研究主要针对 California 地区典型的混凝土桥梁,采用非弹性需求谱进行易损性分析。尽管 CSM 法因其简单快捷的

优点在桥梁抗震设计中得以应用,但该方法仍存在一些缺陷,例如,荷载分布模式以及阻尼比等对分析结果的影响较大。

随着计算机运算效率的提升,目前最受研究人员青睐的计算方法是非线性时程分析(NLTHA)。Shinozuka 等人^[30],Karim 和 Yamazaki F^[31],Hwang 等人^[32],Mackie 和 Stojadinovic^[33],Choi 等人^[34],Nielson^[16],Padgett^[17],Pan 等人^[35],Zhang 和 Huo^[36],Ramanathan 等人^[37]均采用了 NLTHA 方法获得所需的数据。采用该方法进行理论易损性分析有如下优点:(1)NLTHA 是目前计算结构非线性地震响应最准确的方法,且能较准确地考虑结构的多种非线性特性,例如,几何非线性、材料非线性和边界非线性等;(2)NLTHA 方法能够根据需要灵活地选择非线性分析模型所需的维度,例如,2D 模型、3D 模型以及平面或空间地震波输入方式等;(3)NLTHA 方法能综合考虑多种不确定性,例如,地震动不确定性、结构材料不确定性和边界条件不确定性等。

Nielson^[16]在其博士论文中总结了基于 NLTHA 建立桥梁地震易损性曲线的基本流程。不同学者在分析过程中有一定的差异。Hwang 等人^[32]建立 10 个有限元桥梁样本,采用拉丁超立方抽样方法与 100 条人工地震波进行配对(1 个桥梁样本对应 10 条地震波),然后分别进行 NLTHA。Mackie 和 Stojadinovic^[33]根据震中距(R)和震级(M)先建立了包含 100 条波的地震波数据库,以一两跨梁式桥为例建立有限元模型并直接进行 NLTHA。Nielson^[16]和 Padgett^[17]考虑多种不确定性因素的影响,建立了与地震波数量相同的桥梁样本并分别进行 NLTHA。以上研究在地震波的选择和桥梁有限元建模方面不完全一样,但都采用了先建立概率地震需求模型(PSDM),再根据损伤指标进行易损性分析,且 PSDM 的建立都采用了线性回归分析方法。然而,Pan 等人^[35]在大量的 NLTHA 之后,不是先进行概率地震需求分析,而是直接对桥梁不同构件的需求能力比($DCR = \text{Demand}/\text{Capacity}$)进行二次回归分析,以估计不同构件在不同损伤状态的易损性参数。Zhang 和 Huo^[36]同时基于 PSDM 方法和 IDA 方法建立地震易损性曲线,IDA 方法无需要进行回归分析就可以直接计算不同地震强度水平的失效概率。Shinozuka 等人^[30]则先假定易损性曲线服从双参数正态分布函数,然后建立似然函数来评估易损性函数的两个参数,最后得到桥梁的易损性曲线。由此可见,理论地震易损性分析的方法十分丰富,不同研究人员根据不同的研究对象、不同的目标以及不同的计算条件,可选择不同的理论分析方法建立易损性曲线,这表明基于 NLTHA 的地震易损性分析具有广泛的适用性和发展空间,因此本文第 2 节将主要对该方法进行展开介绍。

1.4 混合易损性分析

由前面的论述可知,基于专家意见的数据有较强的主观性,基于震害调查的数据非常少且有区域局限性,基于数值模拟的数据对结构建模过程以及计算方法等客观条件较敏感。然而,混合易损性分析从理论上可以弥补 3 种方法的缺陷^[18]。混合易损性分析方法主要是通过补充结构震害数据,对理论易损性曲线或专家调查易损性曲线进行修正。实际上,研究报告 ATC-25^[19]和 ACT-40^[38]中用到的基于专家调查的地震易损性曲线,都分别加入了来自 San Fernando 地震(1971)和 Northridge 地震(1994)结构和桥梁震害的调查信息。由于不同数据源之间的交集毕竟有限,混合易损性分析方法在目前的应用仍然很少。

2 桥梁地震易损性分析在我国的发展

我国早在 20 世纪末开始就有学者对桥梁的地震易损性进行了相关研究,例如,1988 年,周神根等^[39]根据唐山大地震中 272 座铁路桥梁的震害统计信息,选定地震烈度、墩高、基础类型等 7 种影响因素,采用最小二乘原理建立了易损性分析公式。1994 年,朱美珍^[40]根据唐山、海城、通海地震中 100 多座公路桥梁的震害情况,同样选择包括地震烈度、场地类别度等 9 个影响因素,进行统计回归推导出公路桥梁的震害预测公式。以上研究主要基于历史桥梁震害调查的结果进行震害预测,属于经验易损性分析的范畴,并没有建立桥梁的地震易损性曲线。我国桥梁震害记录的样本量有限,导致这些研究成果不够系统,其工程实用价值不高。

相比欧美和日本等国家,桥梁理论易损性的研究在我国起步较晚。清华大学的刘晶波教授与美国孟菲斯大学的 Hwang 教授进行合作研究以后,2002 年首次将基于数值模拟的理论易损性分析方法引入国内^[41]。随后,湖南大学的易伟建教授和张海燕等人^[42]研究了 4 种不同场地类型的随机延性需求谱,结合 Pushover 分析方法提出了规则梁桥地震易损性分析的简化方法;2006 年同济大学的张菊辉^[43]以规则连续梁桥为研究对象,基于 IDA 方法建立了桥梁易损性曲线,并通过参数分析研究了墩高、配筋率、配箍率的变化对易损

性的影响;2007年北京交通大学的王建民等人^[44]分别采用CSM和NLTHA方法研究了桥梁结构的地震易损性曲线;2008年同济大学的焦驰宇^[45]基于IDA方法建立了大跨斜拉桥的易损性曲线;2009年哈尔滨工业大学的黄明刚^[46]以PEER基于性能的地震工程框架为基准,基于概率地震需求模型(PSDM)建立了桥梁的易损性曲线。

尽管以上研究数量不多并且相互之间比较独立,但积极促进了各种易损性分析方法在我国桥梁工程中的应用和发展。2011年开始我国开始出现大量桥梁地震易损性的研究论文。李立峰等人^[13, 47]针对板式橡胶支座在我国应用广泛的特点,专门研究了板式橡胶支座在地震作用下的易损性,提出了基于易损性曲线的支座加固方案。陈力波等人^[24, 48]对四川汶川大地震中发生破坏的桥梁进行分类,采用多种分析方法对这些桥梁进行了一系列的易损性研究。近几年出现的关于我国桥梁地震易损性的研究成果可归纳出如下特点:(1)运用成熟的理论易损性分析方法对不同类型的单体桥梁进行抗震性能评估,例如:规则梁式桥^[13]、高墩大跨桥梁^[49]、斜拉桥^[50]、悬索桥^[51]、隔震桥梁^[52]等。(2)针对已有的桥梁地震易损性分析方法进行改进,例如,沈国煜等人^[53]采用均匀设计方法和Nataf变换提出了一种桥梁地震易损性分析方法,该方法能考虑结构随机参数间的相关性;李建军^[54]采用基于神经网络(ANN)和基于支持向量机网络(SVM)等智能算法建立了隔震桥梁结构的地震易损性曲线。(3)研究桥梁结构在全寿命基准期内的时变地震易损性,例如,庞于涛等人^[55]以一座斜拉桥的主塔为例,结合人工神经网络(ANN)与蒙特卡罗方法,研究了材料劣变对结构易损性曲线的影响;赵珺和牛荻涛^[56]针对沿海地区服役超过40年的混凝土连续刚构桥,对其服役期间的时变易损性和地震风险进行了研究;李超和李宏男^[57]研究了海洋潮汐环境中氯离子对近海桥梁结构的腐蚀效应,采用易损性曲线评估了桥梁结构在全寿命周期内的抗震性能;李立峰等人^[58]考虑氯离子侵蚀效应引起的墩柱纵筋退化,讨论了其对高墩桥梁抗震能力和地震需求的影响,并建立了桥梁设计基准期内不同时间点的时变易损性曲线。由此可见,桥梁地震易损性相关的研究在我国已逐渐展开,并取得了阶段性的研究成果。特别是近5年来各类前沿的易损性分析方法都在我国得到了应用,越来越多的人开始意识到桥梁地震易损性研究的重要性。

3 理论易损性函数的构建方法

基于NLTHA的易损性函数是建立在大量非线性分析的基础之上,一般可采用参数化方法或非参数化方法来形成地震易损性曲线^[59]。参数化方法先假定易损性曲线的形状,如符合两参数正态累积分布函数或对数正态累积分布函数^[36];非参数化方法则无需提前假定易损性曲线的形状,而直接采用Monte-Carlo等算法得到不同IM处的失效概率,然后形成易损性曲线^[59]。非参数化方法计算量较大,主要被用于验证各参数化方法的准确性和有效性。因此,本文主要综述基于参数化方法的理论易损性函数,即基于传统可靠度理论的易损性分析。既往的研究均采用两参数对数正态累积分布函数来表示结构的地震易损性曲线:

$$P_f(D \geq C | IM = x) = \Phi \left[\frac{\ln(x/\theta)}{\beta} \right] \quad (3)$$

式中 $P_f(D \geq C | IM = x)$ 表示在 $IM = x$ 的地震动作用下结构的需求响应(D)超过其抗震能力(C)的概率; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数; θ 为易损性函数的均值; β 为易损性函数的标准差,表示易损性函数的不确定性。由式(3)可知,准确地估计参数 θ 和 β 的值是建立易损性函数的关键。基于式(3),可以采用不同的统计学方法对这两个参数进行估计。根据各国学者在研究桥梁地震易损性分析时所采用的估计方法不同,本文将基于NLTHA的易损性函数归纳为:“云图法”、“需求能力比对数回归法”、“缩放法”、“极大似然估计法”四种类型。

3.1 “云图法”易损性函数

“云图法”(Cloud Approach)是目前建立地震易损性函数最常用的方法。用该方法形成易损性曲线时首先要选取一定数量的原始地震波记录或人工地震波。相比非参数化方法中用到的地震波的数量,“云图法”的优点是只需几十到几百条地震波,即可较准确地预测结构的地震响应。易损性分析中所选地震波不仅要反映地震波的不确定性(频谱特性、震级和震中距等),还要尽量与实际桥梁工程的场地危险性相符合。“云图法”选地震波的方法最初由Shome和Cornell^[60]提出,他们建议将所选的地震波按震中距、震级和桥址处土壤条件等进行分类,形成地震波库。选定了地震波库并确定IM以后,再建立桥梁有限元模型并进行一系

列的 NLTHA, 得到工程需求参数 (EDP) 与 IM 之间的离散点。根据 Cornell 等人的建议, 可假定结构地震需求服从对数正态分布, 认为工程需求参数的中值 ($\overline{\text{EDP}}$) 与 IM 之间满足如下指数关系^[61]:

$$\overline{\text{EDP}} = a \cdot \text{IM}^b \text{ 或 } \ln(\overline{\text{EDP}}) = b \cdot \ln(\text{IM}) + \ln(a) \quad (4)$$

式中, a , b 分别为估计参数, 可通过最小二乘回归分析得到。上式被称为概率地震需求模型 (PSDM), 该模型能较好地反映 EDP 与 IM 之间的关系, 如图 2 所示, 图中离散点是由 NLTHA 得到的需求参数和相应地震动参数在对数坐标系中的位置, 实线为按式 (4) 进行线性拟合得到的 PSDM, 两条虚线则反映了离散的数据点相对 PSDM 的离散程度, 可用相应的对数标准差 β 表示。需要指出的是, 通常情况下 PSDM 在不同地震动水平下的对数标准差 β 是不同的。然而为了易损性分析的方便, Mackie 等人^[33]认为可以假定在全部 IM 范围内对数标准差为一个定值:

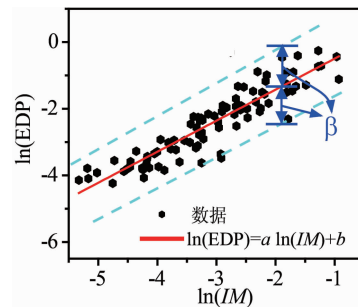


图2 “云图法”建立的概率地震需求模型

Fig. 2 Cloud approach based PSDM

$$\beta_{\text{EDP}|\text{IM}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(D_i) - \ln(\overline{\text{EDP}})]^2}{N-2}} \quad (5)$$

式中, $\beta_{\text{EDP}|\text{IM}}$ 表示地震响应在给定 IM 范围内的条件对数标准差; D_i 为第 i 条地震波作用下的结构响应峰值; N 为进行 NLTHA 的次数。

易损性曲线表示结构在地震作用下结构需求达到或超过指定损伤极限状态的失效概率, 如果假定易损性曲线为对数正态累积分布函数, 则易损性函数可以表示为^[34]:

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln(\overline{\text{EDP}}/S_c)}{\sqrt{\beta_{\text{EDP}|\text{IM}}^2 + \beta_c^2}}\right) \quad (6)$$

式中 S_c 和 β_c 为指定损伤极限状态 (抗震能力) 的均值和对数标准差, 上式即 “云图法” 易损性函数的表达式。

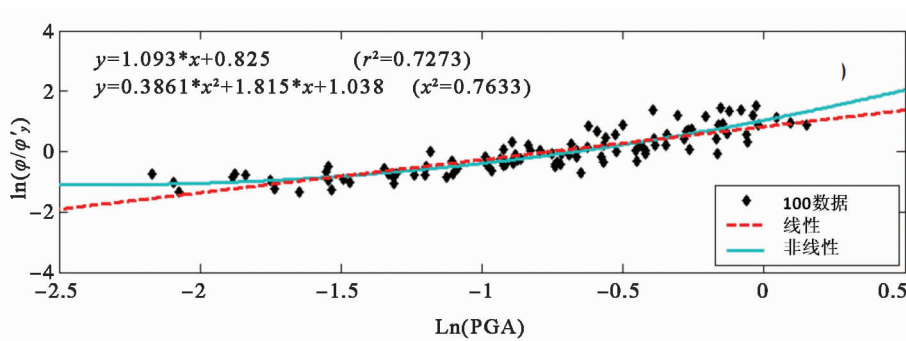


图3 需求能力比对数回归^[35]

Fig. 3 Logarithm regression analysis of demand/capacity

3.2 “需求能力比对数回归法”易损性函数

“需求能力比对数回归法”是 Pan 等人^[35]提出的一种用于桥梁地震易损性分析的方法。该方法同样需要采用原始地震波记录或人工地震波, 其地震波的选取方法、桥梁建模以及 NLTHA 的过程与 “云图法” 类似。不同的是该方法无需先进行概率地震需求分析, 而是定义了不同损伤极限状态的能力值以后, 直接对不同构件的需求能力比 (DCR) 和地震动参数 (IM) 进行对数回归分析, 如图 3 所示, 图中, 横坐标为地震动参数 IM 的对数, 纵坐标为能力需求比 DCR 的对数, 实线和虚线分别表示对地震响应结果进行线性和非线性拟合的结果。

Pan 等人的研究结果^[35]表明采用二次回归分析时的拟合决定系数 (r_2) 比一次回归分析时要大 (图 3), 因此桥梁地震易损性分析中采用二次回归分析进行预测会更准确。同理, 如果假定易损性曲线符合对数正

态累积分布,则地震易损性函数可表示为:

$$P_f = P\left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1\right] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(1) - \lambda}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\lambda}{\sigma}\right) \quad (7)$$

式中, S_d 和 S_c 分别表示结构地震需求和抗震能力; λ 和 σ 分别表示回归分析中 $\ln(S_d/S_c)$ 的均值和标准差:

$$\lambda = a(\ln(IM))^2 + b \ln(IM) + c \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{S_r/(N-2)} \quad (9)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^N (y_i - \lambda_i)^2 \quad (10)$$

式中, a , b , c 分别表示回归分析的估计参数, S_r 是各离散点相对于回归曲线的残差平方和; y_i 为回归分析中第 i 个离散点的纵坐标, λ_i 为回归分析中第 i 个离散点的横坐标值所对应的回归均值。以上各式即为直接基于 DCR 对数回归分析的地震易损性分析过程。

3.3 “缩放法”易损性函数

“缩放法”(Scaling Approach)采用一种类似增量动力分析(IDA)的方法建立地震易损性曲线,也有文献称其为 IDA 方法^[36, 43]。选取一定数量的地震波库及地震动参数(IM)以后,首先将所有地震波的 IM 缩放至同一个强度水平,并输入桥梁有限元模型进行 NLTHA。然后指定桥梁结构或构件在不同损伤状态的极限指标(LS),最后直接对非线性时程分析的结果采用下式进行概率统计分析,以获得结构或构件在指定地震动强度水平(IM)时超过极限状态(LS)的概率:

$$P_f[EDP > LS_i | IM] = \frac{n_i}{N} \quad (i = 1 \sim 4) \quad (11)$$

式中, LS_i 为第 i 种损伤状态($i=1$ 表示轻微损伤; $i=2$ 表示中等损伤; $i=3$ 表示严重损伤; $i=4$ 表示完全破坏); N 表示输入地震波的总数目; n_i 表示能使结构或构件地震响应超过指定损伤极限状态地震波的数目。采用上述方法将地震波缩放至不同的地震动强度水平,即可获得不同地震强度水平下结构或构件的失效概率。然后,将这些失效概率计算值放在以 IM 和 P_f 为横、纵轴的坐标系中,依次相连即可得到易损性曲线。该方法得到地震易损性函数的过程与非参数化方法类似,但由于“缩放法”进行 NLTHA 的计算量远小于非参数化方法,因此得到的易损性曲线会不够光滑,如图 4 所示。同样,采用对数正态累积分布对图 4 中的波折线形易损性曲线进行拟合修正^[36]:

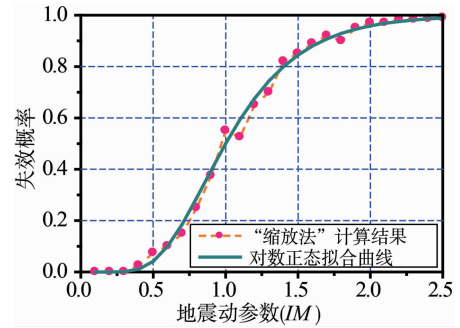


图4 基于“缩放法”易损性曲线

Fig. 4 Scaling approach based fragility curve

$$P_f[EDP > LS_i | IM] = \int_{-\infty}^{IM} \frac{1}{IM \sqrt{2\pi\xi_{IM}^2}} \exp\left\{-\frac{[\ln(IM) - \lambda]^2}{2\xi_{IM}^2}\right\} d(IM) \quad (12)$$

式中, λ 和 ξ 分别为拟合函数的对数均值和标准差。上式可进一步写成如下的等效形式:

$$P_f[EDP > LS_i | IM] = \Phi\left[\frac{\ln(IM) - \lambda}{\xi_{IM}}\right] \quad (13)$$

式(13)和式(3)在形式上是完全一致,图4中平滑的曲线即为拟合之后的桥梁地震易损性曲线。

3.4 “极大似然估计法”易损性函数

“极大似然估计法”是较早被用来建立桥梁地震易损性曲线的方法之一。该方法时只需知道桥梁在地震作用下的二元损伤状态(损伤或未损伤),并不关心结构具体的响应数值,因此该方法原本只用于桥梁经验地震易损性分析^[22],一些学者将 NLTHA 得到的具体数值解直接转化为抽象的二元损伤状态,然后采用“极大似然估计法”建立其理论地震易损性曲线^[62]。首先规定桥梁的地震损伤可分为轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏四种级别,不同损伤状态用 DS_j ($j=1, 2, 3, 4$) 表示。然后假定地震易损性曲线符合两参数对数正态分布:

$$F_j(IM) = \Phi\left[\frac{\ln(IM/c_j)}{\zeta_j}\right] \quad (14)$$

式中, $F_j(\cdot)$ 表示 DS_j 损伤状态的易损性函数; c_j 和 ζ_j 表示 DS_j 损伤状态的中值和对数标准差。则可建立 DS_j 损伤状态易损性函数的似然函数如下:

$$L(c_j, \zeta_j) = \prod_{i=1}^N [F_j(im)]^{\chi_k} [1 - F_j(im)]^{(1-\chi_k)} \quad (15)$$

式中, 当地震动强度水平 $IM = im$ 时, 若发生 DS_j 损伤, 则 $\chi_k = 1$, 否则 $\chi_k = 0$ 。因此对似然函数(17)求极大值, 可以求出相应 c_j 和 ζ_j 的极大估计值。由于直接求 $L(c_j, \zeta_j)$ 的极大值比较困难, 考虑到 $\ln[L(c_j, \zeta_j)]$ 与 $L(c_j, \zeta_j)$ 的极大限相同, 因此 c_j 和 ζ_j 常用以下的似然方程求解:

$$\frac{d \ln[L(c_j, \zeta_j)]}{d c_j} = \frac{d \ln[L(c_j, \zeta_j)]}{d \zeta_j} = 0 \quad (16)$$

采用以上各式可分别求解桥梁在不同损伤状态下的易损性函数。由于假定了不同损伤状态对应易损性曲线之间的相互独立性, 其对数标准差估计值不可能完全相同, 从而导致不同损伤状态的易损性曲线可能发生交叉。然而在实际中不可能出现低等级损伤发生的概率小于高等级损伤发生的概率的情况。因此, Shinozuka 等人^[22] 建议在分析过程中假设对数标准差为一常数, 而只对各中值同时进行参数估计。假设不同损伤等级的对数标准差相同时, 较高等级地震损伤可以看作较低等级地震损伤的子集, 因此分析过程中可将较低等级损伤概率看作是较高等级损伤易损性函数的条件概率。如果用 E_0, E_1, E_2, E_3, E_4 分别表示无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏 5 个事件, 这 5 个事件在 4 种易损性曲线中的图解如图 5, 由图可知:

$$\begin{cases} P_0 = P(E_0, im) = 1 - F_1(c_1, \zeta, im) \\ P_1 = P(E_1, im) = F_1(c_1, \zeta, im) - F_2(c_2, \zeta, im) \\ P_2 = P(E_2, im) = F_2(c_2, \zeta, im) - F_3(c_3, \zeta, im) \\ P_3 = P(E_3, im) = F_3(c_3, \zeta, im) - F_4(c_4, \zeta, im) \\ P_4 = P(E_4, im) = F_4(c_4, \zeta, im) \end{cases} \quad (17)$$

因此似然函数又可以写成:

$$L(c_1, c_2, c_3, c_4, \zeta) = \prod_{i=1}^N \prod_{k=0}^4 [P_k(E_k, im)]^{\chi_k} \quad (18)$$

式中, 当地震动强度水平 $IM = im$ 时, 若事件 E_k 发生, 则 $\chi_k = 1$, 否则 $\chi_k = 0$ 。同理, 可用如下似然方程来同时估计 4 个中值(c_1, c_2, c_3, c_4)以及对数标准差 ζ :

$$\frac{\partial \ln[L(c_1, c_2, c_3, c_4, \zeta)]}{\partial c_j} = \frac{\partial \ln[L(c_1, c_2, c_3, c_4, \zeta)]}{\partial \zeta} = 0 \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (19)$$

Shinozuka 等人^[22] 利用 60 条地震波进行桥梁 NLTHA, 采用以上方法得到了地震易损性曲线, 如图 6 所示。

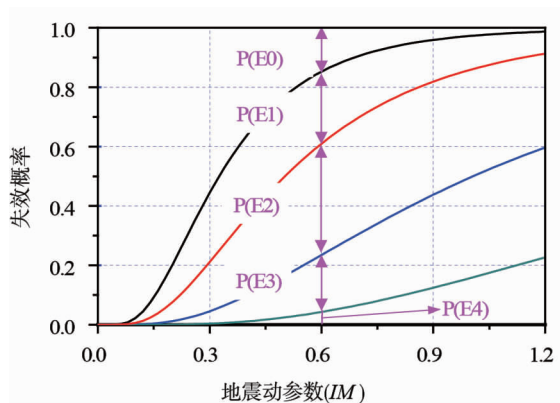


图 5 易损性曲线的图解

Fig. 5 Illustration of fragility curves

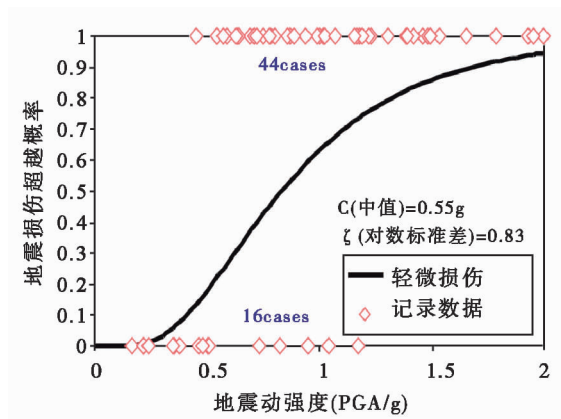


图 6 “最大似然法”易损性曲线^[22]

Fig. 6 Maximum likelihood approach based fragility curve

4 存在的问题

前文对桥梁地震易损性分析方法、特点和适用性进行了综述。相比传统确定性的桥梁抗震分析方法, 地

震易损性分析最大的优点之一是能考虑多种不确定性对地震响应结果的影响。然而,如何准确地量化各类不确定性的影响却又成为易损性分析面临的最大挑战之一,因为地震易损性分析中不确定性反映了对结构动力响应结果或损伤概率的预测精度。一般来说,地震风险评估中不确定性可分为两大类型:事物或事件本身所固有的且不可预测的属性,称为偶然的不确定性;由于人类目前掌握的知识水平的不足导致的不确定性,称认知不确定性。既往的地震易损性研究或多或少的考虑了这些不确定性的影响,且都在强调不确定性的重要性。理论上讲,考虑的不确定性因素越多则建立的地震易损性曲线就会越准确,但如果考虑全部不确定性因素对易损性分析的影响,又会导致桥梁 NLTHA 的计算量很大,因此,过去关于桥梁地震的易损性研究大多只考虑了地震波的不确定性,或者采取较简单的方式来处理其它不确定性因素,这种处理方式是否合理仍有待进一步的研究。

尽管在建筑结构^[63-64]和核电站^[65-66]等工程结构的地震易损性分析中,已经在一定程度上量化了各不确定性的影响。例如,美国 FEMA 提出的“P695 方法”和“P58 方法”针对结构的倒塌地震易损性曲线。然而,这些研究的对象是各种不同类型的建筑结构,其给出的各种不确定性的建议取值,主要是针对大量建筑结构的地震易损性函数统计出来的。目前国内外对于桥梁地震易损性中不确定性的研究也还相对较少,究竟哪些不确定性因素对桥梁地震易损性分析的影响最大,还没有统一的结论。

近十年来,桥梁地震易损性相关的研究在我国取得了显著地发展,并取得了阶段性的研究成果,越来越多的人开始重视地震易损性研究的重要性。世界上主流的地震易损性分析技术都在国内研究中都得到了应用,并在一定程度上有所创新。然而,需要指出的是,目前国内的桥梁地震易损性研究主要是针对特例桥梁的抗震性能评价,研究对象比较单一,研究方法和成果也还缺乏系统性,难以提炼出有广泛应用价值和实际工程意义的信息。考虑到我国桥梁工程所处的地质条件、采用的设计规范以及养护条件等不同,即使外国成熟的研究成果也不一定适合我国的实际情况。

5 结语

本文对目前国内外已有的桥梁地震易损性相关研究成果进行系统地综述,归纳出各种易损性分析方法的特点和适用性,并详细地总结了桥梁地震易损性研究在我国的发展历程和研究现状。针对当前存在的问题,作者认为在今后的研究中可以在以下几个方面进行展开:

(1) 综合既往各种分析方法的特点,建立一套能够系统地考虑多种不确定性的桥梁工程地震易损性分析方法。进一步研究与桥梁结构设计、施工质量、养护条件、实验数据、结构建模、工程场地危险性、地震波频谱特性等相关的不确定性因素的影响。基于概率统计分析方法来量化每一类不确定性的相对大小,并研究各种不确定性之间的联动效应,从而能够直接指导基于性能的桥梁抗震设计。

(2) 由于国内的桥梁地震易损性研究多主要针对特例桥梁进行抗震性能评价,无法反映桥与桥之间差异性的影响,得到的结论的通用性不够。因此,在今后的研究中,可根据我国最新的抗震设防区域的划分对现有的桥梁工程进行系统地统计和分类,建立全国性或区域性的桥梁信息共享数据库,然后,对每一类桥梁进行区域性的地震易损性分析。

(3) 随着我国的城市群迅速扩容,使得人口密度、经济和社会财富急剧增加,现代社会功能的地震易损性、破坏连锁性等正逐步显露出来。为了尽量减少对繁忙交通的阻断,钢桥的应用将会越来越多,而且我国城市钢桥具有轻型化、大型化的特点。然而,目前很少有研究涉及钢桥地震易损性的研究,因此也需要进一步研究各类钢桥的地震易损性。

(4) 桥梁工程的使用环境通常比较恶劣,养护条件也较差。随着结构服役时间的增长,大气环境中氯离子侵蚀效应、混凝土碳化效应等会导致结构抗震性能逐渐退化。在今后的研究中,需要将桥梁全寿命设计的理念与基于性能的抗震设计理念相结合,进一步深入探讨桥梁结构在服役期内的时变抗震性能,建立桥梁结构的时变地震易损性曲线。

参考文献:

- [1] 王克海. 桥梁抗震研究[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
WANG Kehai. Research on seismic resistance of bridges[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2014. (in Chinese)
- [2] Cornell C A, Krawinkler H. Progress and challenges in seismic performance assessment[J]. PEER Center News, 2000, 3(2): 1-3.

- [3] Padgett J E, Desroches R. Sensitivity of seismic response and fragility to parameter uncertainty[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(12): 1710–1718.
- [4] Pan Y, Agrawal A K, Ghosn M, et al. Seismic fragility of multispan simply supported steel highway bridges in New York State. I: bridge modeling, parametric analysis, and retrofit design[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(5): 448–461.
- [5] Nielson B, Pang W. Effect of ground motion suite size on uncertainty estimation in seismic bridge fragility modeling[C]// 2011 Structures Congress. 2011. Las Vegas.
- [6] Tavares D, Suescun J, Paultre P, et al. Seismic fragility of a highway bridge in quebec[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(11): 1131–1139.
- [7] Baker J W, Lin T, Shahi S K, et al. New ground motion selection procedures and selected motions for the PEER transportation research program [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California; Berkeley, 2011.
- [8] Kaviani P, Zareian F, Taciroglu E. Performance-based seismic assessment of skewed bridges[R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California; Berkeley, 2014.
- [9] 陈洪富, 孙柏涛, 陈相兆, 等. HAZ-China 地震灾害损失评估系统研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 294–300.
CHEN Hongfu, SUN Baitao, CHEN Xiangzhao, et al. HAZ-China earthquake disaster loss estimation system[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 294–300. (in Chinese)
- [10] 王光远. 论不确定性结构力学的发展[J]. 力学进展, 2002, 32(2): 205–211.
WANG Guangyuan. On the development of uncertain structural mechanics [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(2): 205–211. (in Chinese)
- [11] 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, LV Dagang. Seismic collapse fragility analysis considering structural uncertainties[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 8–14. (in Chinese)
- [12] 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): 04013015.
- [13] 李立峰, 吴文朋, 黄佳梅, 等. 地震作用下中等跨径 RC 连续梁桥系统易损性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 152–160.
LI Lifeng, WU Wenpeng, HUANG Jiamei, et al. Research on system vulnerability of medium-span reinforced concrete continuous girder bridge under earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 152–160. (in Chinese)
- [14] 谢礼立, 马玉宏, 翟长海, 等. 基于性能的抗震设防与设计地震动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
XIE Lili, MA Yuhong, ZHAI Changhai, et al. Performance-based seismic design and design ground motion[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] ATC. Earthquake damage evaluation data for California[R]. Applied Technology Council; Redwood City, 1985.
- [16] Nielson B. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones[D]. Atlanta; Georgia Institute of Technology, 2005.
- [17] Padgett J E. Seismic vulnerability assessment of retrofitted bridges using probabilistic methods[D]. Atlanta; Georgia Institute of Technology, 2007.
- [18] Rossetto T, Elnashai A. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data[J]. Engineering Structures, 2003, 25(10): 1241–1263.
- [19] ATC. Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the Conterminous United States[R]. Applied Technology Council; Redwood City, 1991.
- [20] Basoz N, Kiremidjian A. Evaluation of bridge damage data from the Loma Prieta and Northridge, California earthquakes[R]. 1998.
- [21] Basoz N I, Kiremidjian A S, King S A, et al. Statistical analysis of bridge damage data from the 1994 Northridge, CA, earthquake[J]. Earthquake Spectra, 1999, 15(1): 25–54.
- [22] Shinozuka M, Feng M, Lee J, et al. Statistical analysis of fragility curves[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1224–1231.
- [23] Yamazaki F, Motomura H, Hamada T. Damage assessment of expressway networks in Japan based on seismic monitoring[C]// Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. 2000. Auckland.
- [24] 陈力波, 郑凯峰, 庄卫林, 等. 汶川地震桥梁易损性分析[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(4): 558–566.
CHEN Libo, ZHENG Kaifeng, ZHUANG Weilin, et al. Analytical investigation of bridge seismic vulnerability in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University. 2012, 47(4): 558–566. (in Chinese)
- [25] Ouyang Y, David L A, Vincent P D. Seismic vulnerability assessment of bridges on earthquake priority routes in Western Kentucky[C]// Life-line Earthquake Engineering (1991). 1991. Los Angeles.
- [26] Jernigan J, Hwang H. Development of bridge fragility curves[C]// 7th US National Conference on Earthquake Engineering Boston. 2002.
- [27] Dutta A. On energy based seismic analysis and design of highway bridges[D]. Buffalo; State University of New York at Buffalo, 1999.
- [28] Mander J B, Basöz N. Seismic fragility curve theory for highway bridges[C]// Optimizing post-earthquake lifeline system reliability Seattle, 1999.
- [29] Shinozuka M, Feng M, Kim H, et al. Nonlinear static procedure for fragility curve development[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1287–1295.

- [30] Shinozuka M, Kim S-H, Koshiyama S, et al. Fragility curves of concrete bridges retrofitted by column jacketing[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 1(2): 195–205.
- [31] Karim K R, Yamazaki F. Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001, 30(12): 1839–1856.
- [32] Hwang H, Liu J B, Chiu Y H. Seismic fragility analysis of highway bridges[R]. Mid-America Earthquake Center, The University of Memphis: Urbana, 2001.
- [33] Mackie K, Stojadinovic B. Probabilistic seismic demand model for California highway bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6(6): 468–48.
- [34] Choi E, Desroches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(2): 187–199.
- [35] Pan Y, Agrawal A K, Ghosn M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York State[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2007, 12(6): 689–699.
- [36] Zhang J, Huo Y. Evaluating effectiveness and optimum design of isolation devices for highway bridges using the fragility function method[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(8): 1648–1660.
- [37] Ramanathan K, Desroches R, Padgett J E. A comparison of pre- and post-seismic design considerations in moderate seismic zones through the fragility assessment of multispan bridge classes[J]. *Engineering Structures*, 2012, 45: 559–573.
- [38] ATC. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[R]. Applied Technology Council: Redwood City, 1996.
- [39] 周神根, 王天威, 杨春环. 铁路桥梁震害简易预测法, 抗震防灾对策[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1988.
ZHOU Shengen, WANG Tianwei, YANG Chunhuan. Simplified prediction method and seismic resistance and disaster prevention of railway bridges [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [40] 朱美珍. 公路桥梁震害预测的实用方法[J]. 同济大学学报, 1994, 22(3): 279–283.
ZHU Meizhen. A practical method for predicting seismic damage of highway bridges[J]. *Journal of Tongji University*. 1994, 22(3): 279–283. (in Chinese).
- [41] Hwang H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 47–51.
Hwang H, Liu J B. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(6): 47–51. (in Chinese).
- [42] 张海燕. 基于位移的概率地震需求分析与结构抗震设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
ZHANG Haiyan. Displacement-based probabilistic seismic demand analysis and structural seismic design research [D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)
- [43] 张菊辉. 基于数值模拟的规则梁桥墩柱的地震易损性分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
ZHANG Juhui. Study on seismic vulnerability analysis of normal beam bridge piers based on numerical simulation[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [44] 王建民, 朱 晞. 地震作用下高架桥结构的脆弱性[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 68–72.
WANG Jianmin, ZHU Xi. Fragility of viaduct structure under seismic effect [J]. *China Journal of Highway and Transport*. 2007, 20(1): 68–72. (in Chinese)
- [45] 焦驰宇. 基于性能的大跨斜拉桥地震易损性分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.
JIAO Chiyu. Seismic Fragility analysis of long-span cable-stayed bridges based on performance [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [46] 黄明刚. 钢筋混凝土连续梁桥的地震易损性, 危险性及风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
HUANG Minggang. Seismic fragility, hazard and risk analysis of reinforced concrete continuous girder bridges [J]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2009. (in Chinese)
- [47] 李立峰, 吴文朋, 黄佳梅, 等. 板式橡胶支座地震易损性分析[J]. 湖南大学学报, 2011, 38(11): 1–6.
LI Lifeng, WU Wenpeng, HUANG Jiamei, et al. Research on seismic vulnerability analysis of laminated rubber bearing [J]. *Journal of Hunan University*, 2011, 38(11): 1–6. (in Chinese)
- [48] 郑凯锋, 陈力波, 庄卫林, 等. 基于概率性地震需求模型的桥梁易损性分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 165–171+187.
ZHENG Kaifeng, CHEN Libo, ZHUANG Weilin et al. Bridge vulnerability analysis based on probabilistic seismic demand model [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(5): 165–171. (in Chinese)
- [49] 吴文朋, 李立峰, 王连华, 等. 基于IDA的高墩大跨桥梁地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012(03): 117–123.
WU Wenpeng, LI Lifeng, WANG Lianhua, et al. Evaluation of seismic vulnerability of high-pier long-span bridge using incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2012, 32(3): 117–123. (in Chinese)
- [50] 谷 音, 郑文婷, 卓卫东. 基于LHS-MC方法的矮塔斜拉桥地震风险概率分析[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 96–102+110.
GU Yin, ZHENG Wenting, ZHUO Weidong. Analysis of seismic risk probability assessment of lower-tower cable-stayed bridge based on LHS-MC method [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 96–102, 110. (in Chinese)
- [51] 余 崇. 矮寨大桥基于性能的地震易损性分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
YU Chong. Performance-based seismic fragility analysis of Aizhai bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)

- [52] 王彤, 王炎, 谢旭, 等. 不等高桥墩铁路减隔震桥梁钢阻尼支座地震易损性[J]. 浙江大学学报, 2014, 48(11): 1909–1916.
WANG Tong, WANG Yan, XIE Xu, et al. Seismic fragility of steel damper bearings in isolated railway bridges with different-height piers[J]. Journal of Zhejiang University, 2014, 48(11): 1909–1916. (in Chinese)
- [53] 沈国煜, 袁万城, 庞于涛. 基于 Nataf 变换的桥梁结构地震易损性分析[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 93–100.
SHEN Guoyu, YUAN Wancheng, PANG Yutao. Bridge seismic fragility analysis based on Nataf transformation [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 93–100. (in Chinese)
- [54] 李建军. 基于智能算法的 RC 隔震连续梁桥地震易损性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
LI Jianjun. Intelligent algorithms-based fragility analysis of isolated RC continuous highway bridge using LRB[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [55] 庞于涛, 袁万城, 党新志, 等. 考虑材料劣变过程的桥梁地震易损性分析[J]. 同济大学学报, 2013, 41(3): 348–354.
PANG Yutao YUAN Wancheng, DANG Xingzhi, et al. Stochastic fragility analysis of bridges considering the material deterioration[J]. Journal of Tongji University. 2013, 41(3): 348–354. (in Chinese)
- [56] 赵珺, 牛荻涛. 在役钢筋混凝土连续刚构桥梁抗震性能评估[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 74–81.
ZHAO Jun, NIU Ditao. Seismic performance evaluation for reinforced concrete continuous rigid frame bridge in service[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 74–81. (in Chinese)
- [57] 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.
LI Chao, LI Hongnan. Life-cycle seismic performance evaluation of offshore bridge structures considering chloride ions corrosion effect[J], Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 70–77. (in Chinese)
- [58] Li L, Wu W, Shao X. Seismic performance of the high-pier long-span continuous rigid frame bridges composed of the ultra-high performance concrete[C]// IABSE Madrid Symposium; Engineering for Progress, Nature and People Madrid 2014.
- [59] Sudret B, Mai C, Konakli K. Computing seismic fragility curves using non-parametric representations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014.
- [60] Shome N, Cornell C, Bazzurro P, et al. Earthquakes, records, and nonlinear responses[J]. Earthquake Spectra, 1998, 14(3): 469–500.
- [61] Cornell C, Jalayer F, Hamburger R, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526–533.
- [62] Kim S, Shinozuka M. Development of fragility curves of bridges retrofitted by column jacketing[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19(1–2): 105–112.
- [63] Liel A B, Haselton C B, Deierlein G G, et al. Incorporating modeling uncertainties in the assessment of seismic collapse risk of buildings[J]. Structural Safety, 2009, 31(2): 197–211.
- [64] Celik O C, Ellingwood B R. Seismic fragilities for non-ductile reinforced concrete frames – Role of aleatoric and epistemic uncertainties[J]. Structural Safety, 2010, 32(1): 1–12.
- [65] Pisharady A S, Basu P C. Methods to derive seismic fragility of NPP components: A summary[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(11): 3878–3887.
- [66] Katona T J. Options for the treatment of uncertainty in seismic safety assessment of Nuclear Power Plants[J]. Journal of Disaster Research, 2013, 8(3): 465–472.