

考虑材料劣变过程的桥梁地震易损性分析

庞于涛, 袁万城, 党新志, 沈国煜

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 建立了一套基于概率和非线性有限元的桥梁结构地震性能演变分析方法, 分析了材料劣变过程; 且结合人工神经网络(ANN)与蒙特卡罗(MC)方法, 建立了结构随机能力模型; 在能力模型的基础上, 通过增量动力分析(IDA), 建立了考虑材料劣变过程的需求模型, 从而形成地震易损性曲线; 并以一座斜拉桥的主塔为例, 利用所建立的方法研究了随着服役年限增加结构易损性的变化规律. 研究成果可为桥梁的全寿命设计、既有桥梁的运营以及地震风险评估等提供理论依据.

关键词: 材料劣变; 地震易损性; 复合随机性; 人工神经网络-蒙特卡罗(ANN-MC)方法

中图分类号: TU 312.1

文献标志码: A

Stochastic Fragility Analysis of Bridges with a Consideration of Material Deterioration

PANG Yutao, YUAN Wancheng, DANG Xinzhi, SHEN Guoyu
(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this study, a material deterioration model is developed. And a structural capacity and demand model by taking material deterioration is developed into consideration with the artificial neural network (ANN)-Mento Carlo (MC) method. Based on the capacity and demand model, fragility curves are formed. Moreover, a case study of the main tower of cable-stayed bridge with the proposed method is provided to illustrate the details and structural vulnerability. These achievements will provide theoretical basis and analysis support for the life-cycle design, the operation and management, especially the seismic hazard assessment of bridges.

Key words: material deterioration; fragility analysis; compound stochastic; artificial neural network (ANN)-Mento Carlo (MC) method

随着国家公路交通与道路桥梁网络系统高速开展, 截止 2011 年底, 全国公路桥梁达 68.94 万座. 虽然我国公路桥梁数量众多, 但随着时间的推移, 越来越多的桥梁由于各种原因发生材料老化与结构性损伤, 总体状况不容乐观. 1994 年上海市的桥梁普查, 发现 27% 的桥梁存在承载能力的退化. 2000 年广州交通厅对广东省 1.87 万座桥梁进行普查, 发现 4 224 座存在不同程度的损伤. 类似的情况在发达国家也存在, 2008 年美国联邦公路局所支持的研究项目曾对美国现有桥梁(共有约 600 905 座)的情况进行了调查, 发现 26.9% 的桥梁存在结构性缺陷或者能力不足等问题.

材料劣变会使桥梁结构的能力与刚度发生退化, 一旦发生地震, 现有的能力将无法保证结构在寿命期内完成其预定抗震功能. 很多试验对人工腐蚀过程^[1]或者自然腐蚀过程^[2]下的混凝土梁在静力作用下的力学行为作了研究, 结果发现随着腐蚀的加深, 梁的承载力以及延性的损失越大, 梁从延性破坏转变为脆性破坏. 然而涉及桥梁在寿命期内考虑材料劣变的情况下抗震性能的研究才刚刚开始, Choe 等^[3]采用概率方法通过对遭受腐蚀的钢筋混凝土柱在地震作用下的力学行为进行了研究, 发现遭受腐蚀的钢筋减少了钢筋混凝土柱的抗震能力. Simon 等^[4]则对一座既有桥梁在地震作用下的力学行为与易损性进行了分析. Berto 等^[5]对既有混凝土桥梁在结构劣化的情况下的抗震性能进行了评估. 然而多数研究并未给出材料劣变对桥梁地震易损性的影响的时间效应与计算方法. 因而本文对材料劣变影响下的桥梁地震易损性进行了研究, 并以一座斜拉桥主塔为例, 研究在考虑材料劣变影响下的结构性能演变规律.

1 材料劣变对结构的影响

对于材料劣变对钢筋混凝土力学行为的影响,学界在过去的二三十年间做了大量的研究,不管是数值模拟^[6]还是实验研究^[2-3].诸如物理、化学以及环境因素等的侵袭,都会使材料发生劣变,而其中混凝土较差的耐久性与钢筋的腐蚀是最大影响因素^[3].特别是钢筋的腐蚀,不仅对钢筋强度产生了影响,也影响着钢筋周围的混凝土材料的力学性能以及钢筋混凝土两种材料的相互作用.对于钢筋的腐蚀所引起的效应主要有以下几种:①在碳酸化合物的影响下,钢筋的面积减少,这是导致结构能力退化的主要因素;②很多试验表明,钢筋的延性以及钢筋的屈服强度都会随着钢筋面积的减少发生改变;③由于腐蚀所产生的结构内部的膨胀,可能导致混凝土中产生拉应力,从而导致混凝土材料的开裂,特别是混凝土保护层的开裂.

氯离子侵蚀区的环境参数影响着钢筋的腐蚀过程,这些参数主要包括:大气温度 T 、相对湿度 R_H 、混凝土表面氯离子浓度 M_s 、钢筋锈蚀临界氯离子浓度 M_{cr} 以及氯离子扩散系数 D_c . 由于这些环境参数决定着钢筋开始腐蚀的时间,根据 Enright 等^[7]的研究成果,钢筋腐蚀的初始时间如下:

$$t_{\text{init}} = \frac{X_c}{4D_c} \left[\text{erf}^{-1} \left(\frac{M_s - M_{cr}}{M_s} \right) \right]^2 \quad (1)$$

式中: X_c 为混凝土保护层厚度; $\text{erf}^{-1}(\cdot)$ 为误差函数的反函数. 目前对于混凝土表面氯离子浓度 M_s 的调查数据非常有限,根据文献^[7]建议,取 M_s 为混凝土质量的 0.2%; 而钢筋锈蚀临界氯离子浓度 M_{cr} 定义为锈蚀过程开始时刻的钢筋表面氯离子浓度,根据现有研究成果显示, M_{cr} 主要受混凝土强度的影响,这里根据文献^[8]的建议,为 $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 氯离子扩散系数 D_c 反映了混凝土的渗透性,由于众多因素影响其值. 参看了 Val 和 Pavel^[9] 的取值,为 0.631;

当腐蚀开始后,钢筋上的薄膜开始消散,钢筋上开始出现锈蚀层. 这个过程持续到钢筋的锈蚀层体积的扩大,致使混凝土发生开裂. 在本文中,混凝土开裂的时间将使用 Faraday 法则^[9]进行计算,并认为混凝土开裂的时间与钢筋损失的质量有关. 单位长度的钢筋质量的损失表示如下:

$$\Delta M_{\text{loss}}(t) = k\pi D(t) i_{\text{corr}}(t - t_{\text{init}}) \quad (2)$$

式中: k 为质量运输系数,一般取为 2.893×10^{-9} ;

i_{corr} 为腐蚀密度,一般取为 $3 \sim 8 \times 10^8 \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$; t_{init} 为钢筋腐蚀的初始时刻; $D(t)$ 为 t 时刻的钢筋直径,确定如下:

$$D(t) = \sqrt{D_0^2 - 4\Delta V_{\text{loss}}(t)/\pi} \quad (3)$$

式中: D_0 为钢筋的初始直径; $\Delta V_{\text{loss}}(t)$ 可由钢筋损失的质量 $\Delta M_{\text{loss}}(t)$ 得到.

锈蚀对于钢筋屈服强度的影响, Du 等^[10]使用试验方法进行了研究,并提出了相应的计算公式. 根据 Du 的研究成果,钢筋的屈服强度可估计如下:

$$f_y(t) = [1 - \alpha P_{\text{cor}}(t)] f_{y0} \quad (4)$$

式中: α 为经验系数,取为 0.0054; $P_{\text{cor}}(t)$ 为钢筋质量损失的百分比; f_{y0} 为起初钢筋的屈服强度. 而混凝土开裂宽度 ω_c 的计算公式由 Vidal 给出:

$$\omega_c = K_c [\Delta A_s(t) - \Delta A_0] \quad (5)$$

式中: $\Delta A_s(t)$ 为锈蚀过程中钢筋减少的面积; ΔA_0 为混凝土开裂初的钢筋损失面积; K_c 为经验系数,取为 0.058. 且一般认为,当混凝土开裂的宽度超过 1 mm 时,混凝土保护层退出工作. 根据本文给定的数值,经过计算,得到钢筋的腐蚀年份为服役后 8.79 年,且混凝土在 1.48 年后达到极限值. 由于本文以 20 年一个间隔计算结构的地震易损性,因而在第一次分析后,基本认为混凝土保护层已经退出工作. 需要说明的是,本文考虑混凝土和钢筋材料劣变过程的计算公式都是根据文献中的钢筋混凝土梁的试验或统计结果得到的,而这些计算公式更多地考虑了结构所在区域的环境因素,而没有考虑不同受力状态对材料劣变的影响. 不同结构构件的受力情况或许影响了这些公式的合理应用. 另外,本文在考虑钢筋面积损失后,并没有考虑钢筋与混凝土之间的粘结-滑移效应的影响,以及由此引起的结构刚度和强度退化.

2 ANN-MC 方法

2.1 适于大规模抽样计算的弯矩曲率计算程序

由于用于计算截面的弯矩曲率程序 Ucfyber 并不适于进行大规范抽样分析,因而本文利用 OpenSees 开源软件与 Matlab 软件,结合人工神经网络(ANN)^[11]与蒙特卡罗(MC)方法,开发适于大规模抽样计算的弯矩曲率程序. 图 1 给出了在相同材料本构曲线下, OpenSees 软件弯矩曲率程序计算的某一空心截面弯矩曲率与 Ucfyber 计算值的对比,两者吻合得很好. 本文采用正交设计法来设计人工神经网络训练样本,应用人工神经网络和蒙特卡

罗的方法对钢筋混凝土截面能力进行概率分析. 其流程图如图 2 所示. 图 3 给出了图 4 所示的空心截面运用蒙特卡罗方法抽样计算后得到的各个服役年限的首次屈服曲率的累积分布函数图, 图中尺寸 a, b, c, d 随塔身位置的不同而不同. 计算中截面的材料特性概率分布, 截面尺寸则分别由图 4 与表 1 给出.

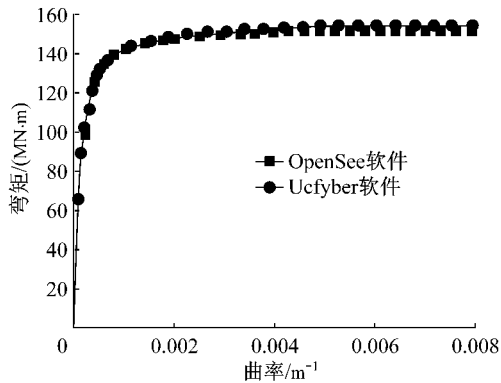


图 1 OpenSees 与 Ucyber 软件弯矩曲率曲线对比

Fig. 1 The comparison of Moment - curvature curves generated by OpenSees and Ucyber

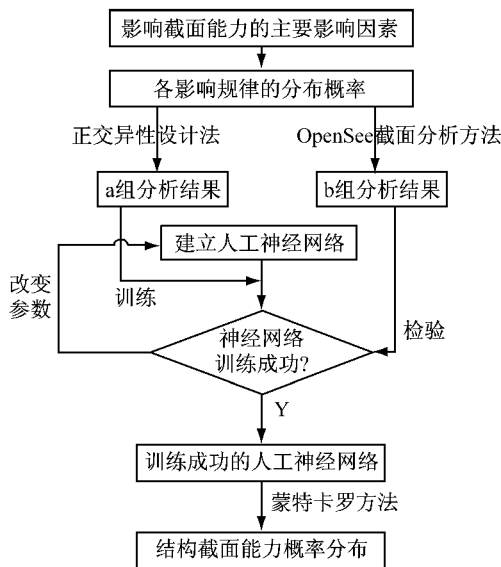


图 2 建立截面能力概率模型的步骤

Fig. 2 The procedure of building the capacity model of key sections

2.2 考虑材料劣变的复合随机性地震易损性方法

近年来, 桥梁地震易损性分析逐渐发展成为研究结构在地震下的损伤规律与地震风险评估中的强有力的工具. 目前结构易损性分析方法主要包括两种方法: 第一种是经验方法, 第二种是理论分析方法. 第一种方法通常由专家根据大量震害调查, 对破坏概率进行曲线拟合得到, 从而得到地震易损性曲线; Kiremidjian 等^[12]基于 Northridge 地震后得到的桥梁损伤数据, 采用逻辑回归分析建立了经验易损

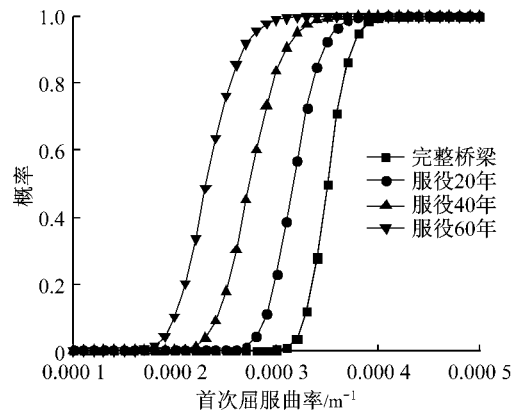


图 3 空心截面首次屈服曲率累积分布函数图

Fig. 3 The cumulative distribution function (CDF) of the first yield curvature of the hollow sections

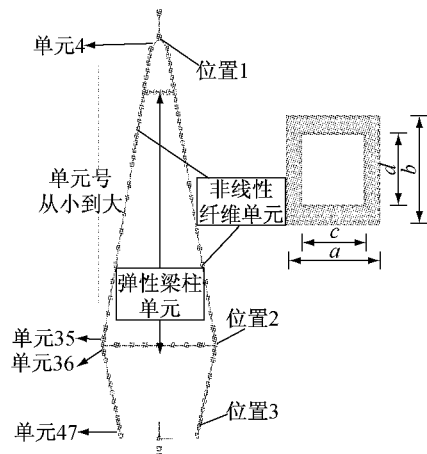


图 4 主塔的截面尺寸与有限元模型

Fig. 4 The layout of the tower section and finite element models

性曲线; Shinozuka 等^[13]基于 1995 年神户地震中观测到的桥梁损伤数据, 建立了桥梁墩柱的经验易损性曲线. 第二种方法当前主要采用基于确定性有限元分析的蒙特卡罗模拟法获得大量的地震易损性数据, 作为统计分析的样本绘制易损性曲线. Hwang 等^[14]针对一座四跨简支桥梁, 通过非线性时程分析获得结构的地震响应数据, 采用逻辑模型来确定结构在地面运动参数下超越某一损伤状态的条件概率. 然而以往的桥梁结构地震易损性曲线大多只考虑了地震输入的随机性, 而对于桥梁结构自身参数的随机性对地震易损性曲线的影响则没有考虑. 关于结构随机性对结构地震易损性曲线的影响, 文献 [11]对复合随机易损性曲线与不考虑结构参数随机性的桥梁结构地震易损性曲线进行了对比分析. 对比曲线如图 5 所示. 当没有考虑结构随机性时, 地震易损性曲线是带有折线性质的, 而复合随机地震易损性曲线则比较平滑, 离散性较小. 因而本文将考虑

结构的随机性,且将钢筋锈蚀过程对结构力学性能的影响计入到易损性的分析中来,具体的方案流程图如图 6 所示.

表 1 模型结构模型参数的统计特征

Tab.1 The random variables considered in built models

随机变量	分布类型	平均值	变异系数
核心混凝土抗压强度/MPa	正态分布	26.1	0.17
保护层混凝土抗压强度/MPa	正态分布	18.4	0.05
纵向钢筋屈服强度/MPa	对数正态分布	384.8	0.07
纵向钢筋弹性模量/MPa	正态分布	2.8×10^5	0.04
纵向钢筋硬化比	正态分布	1.2×10^{-3}	0.05
空心截面长度/m	正态分布	a	0.01
空心截面宽度/m	正态分布	b	0.01
空心截面内环长度/m	正态分布	c	0.01
空心截面内环宽度/m	正态分布	d	0.01

注: a, b, c, d 根据具体空心截面的取值而定.

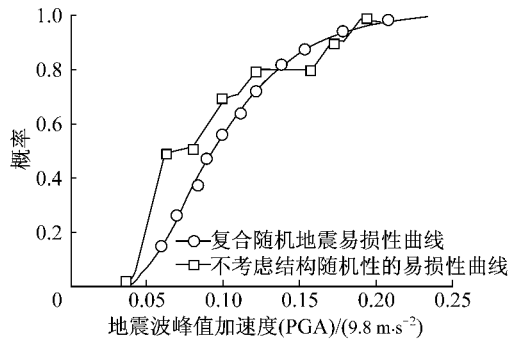


图 5 结构随机性对地震易损性曲线的影响

Fig.5 The influence of the structural uncertainty on the seismic fragility curves

应谱曲线.

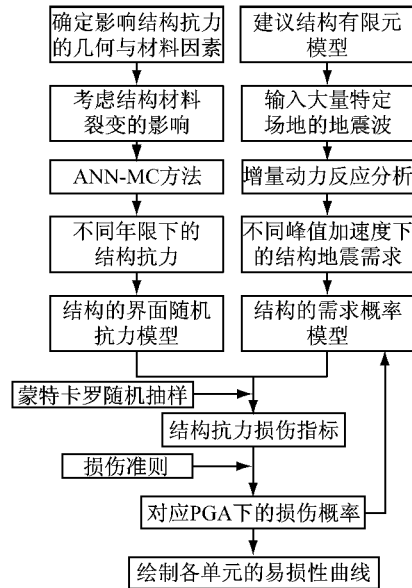


图 6 考虑材料恶劣变的复合地震易损性分析
Fig.6 The flow chart of the fragility analysis considering the material deterioration

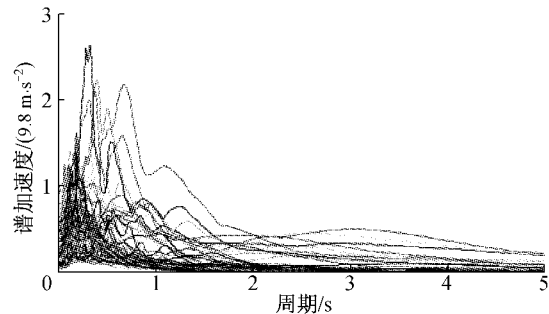


图 7 56 条地震波的反应谱曲线

Fig.7 Pseudo-acceleration spectra of the selected 56 ground motions

3 算例

3.1 有限元模型与地震响应分析

本文所选某一座独塔双索面斜拉桥桥塔,全桥总长为 1 255 m,跨径布置为 150 m+125 m,桥面宽 35 m.主梁采用工字钢和混凝土板的组合梁,主塔为 A 形混凝土塔.图 4 所示为该桥主塔的截面尺寸与 OpenSees 非线性有限元模型.桥塔全部采用 C30 混凝土,纵向钢筋采用二级钢筋.本文没有考虑桩土相互作用,墩底采用了固结的形式.主梁、拉索以及配重采用全部质量集中于塔顶的方法,为 4 500 t.全塔高为 103 m,共划分了 91 个非线性梁柱单元.单元的编号从塔顶到塔底依次为 1 至 47 号,塔的上横梁与下横梁都运用了弹性梁柱单元,塔身运用了非线性纤维单元,且塔身共建立了 4 种纤维截面.有限元模型采用集中质量矩阵.选取的三类场地共 56 条地震波,地震持时均取为 30 s,图 7 给出了 56 条波的反

地震易损性分析分为三个部分:结构的能力计算、结构的地震需求计算以及地震易损性曲线的形成.在能力计算部分,运用前文基于神经网络与蒙特卡罗的方法,使得神经网络准确地仿真出结构各部位的首次屈服曲率,表 1 给出了所考虑的结构随机性的随机变量.在主塔的地震需求计算部分,确定在地震作用下的结构需求随机模型.对有限元模型施加纵向地震波,并进行增量动力分析(IDA).把每条地震波的峰值加速度按比例从 0.1g (g 为重力加速度)缩放到 2.0g,步长为 0.1g,分别对主塔结构进行 IDA 分析,分析结果主要记录了各单元曲率的时程响应.对于每个工况,桥塔各单元都有 56 条地震波所对应时程响应,限于篇幅,仅绘制部分地震波曲率响应分布图和 IDA 曲线,如图 8—9 所示.需要说明的是,第 1 条地震波与第 10 条地震

波分别是 Imperial Valley 地震波与 Northridge 地震波。

有了前文的工作基础,便可以通过已经训练成熟的径向基函数(RBF)神经网络来仿真得到在随机参数下的关键位置的截面屈服曲率.同时,利用结构在不同的地震波作用下响应的统计特征,应用蒙特卡罗随机抽样的方法来进行随机抽样,得到相应峰值加速度(PGA)下的结构曲率响应,不同服役年限的曲率响应的统计分布函数由图 10 给出,这里仅给出了 PGA=1.5g 时的情况.接着,根据给出的定量损伤指标值就能绘制桥梁墩柱的地震易损性曲线,如图 11 所示.图 11 中 4 条易损性曲线将桥梁墩柱的损伤状况分为 5 个区间,分别代表无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤和倒塌区间.

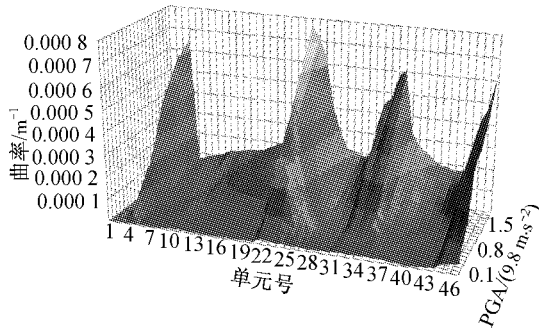


图 8 第 1 条地震波的曲率 IDA 曲线图
Fig.8 The IDA curvature curves of the first ground motions

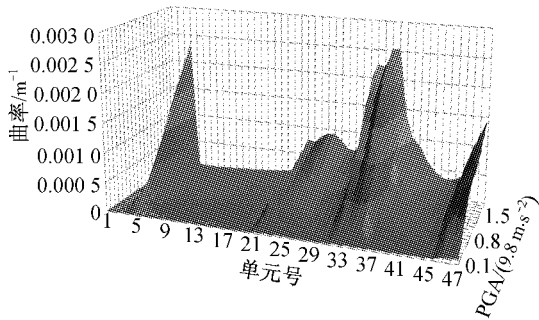


图 9 第 10 条地震波的曲率 IDA 曲线图
Fig.9 The IDA curvature curves of the tenth ground motions

3.2 复合随机性地震易损性分析

在地震易损性的分析中需要定义结构损伤的衡量指标,本文参看了 HAZUS-MH MR3^[13]关于结构性能的划分标准,划分如下:①轻微损伤;②中等损伤;③严重损伤;④倒塌(或彻底破坏).本文使用结构曲率延性系数来定义损伤阶段,曲率延性系数取为地震反应下的结构曲率与首次屈服曲率的比值.

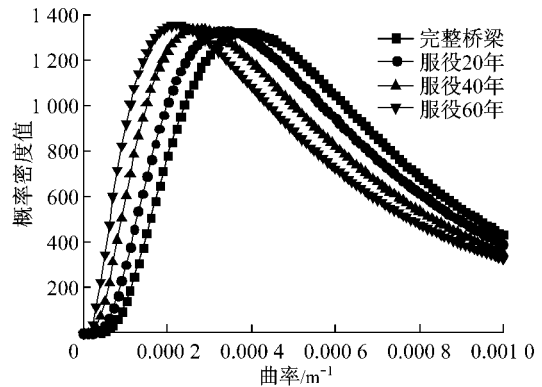


图 10 不同服役年限的塔底曲率分布函数 (峰值加速度 PGA=1.5g)

Fig.10 The distribution of curvature at the base of tower with different servicelives(PGA=1.5g)

对于各个损伤等级,曲率延性系数的取值^[15]分别为 1.0,2.0,4.0,7.0.通过本文 2.2 节的方法建立首次屈服曲率的随机能力模型,并通过 56 条地震波的时程分析来建立需求模型,然后利用 Monte Carlo 方法随机抽取能力需求的概率分布函数的 N 组样本,根据定义的损伤等级,对结构进行损伤判断.如果在 N 组样本中, n 个样本的损伤,则可以得到该损伤等级下的失效概率:

$$P_i = n/N \quad (6)$$

在得到各损伤等级的失效概率以后,本文使用三次样条拟合方式来得到易损性曲线.图 11 给出了塔底单元的地震易损性曲线.从图 8—9 可以看出,结构的曲率响应较大的位置为塔顶与塔身交接处、下横梁处以及塔底.对于这几个部位,本文均计算了其易损性曲线.图 12 给出了 3 个位置的地震易损性曲线.从图中可以看出,对于本文给定的性能指标,塔底更容易受到损伤,为结构的最不利位置.对于主塔结构,由于设计中要求主塔不能产生不可修复的破坏,因而可以将整体结构看成是串联结构.因而下文在研究钢筋腐蚀影响下的主塔性能演变规律时,

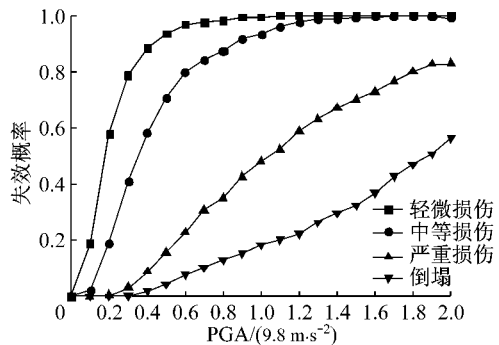


图 11 塔底单元的地震易损性曲线
Fig.11 The fragility curves of base element of tower

取塔底的曲率响应值来建立结构的需求模型。

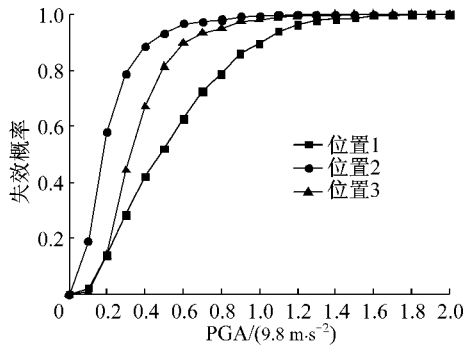


图 12 塔身三个不利位置的地震易损性曲线
Fig. 12 The fragility curves of three key sections

为了研究氯离子引起的钢筋锈蚀过程对桥梁结构地震易损性的影响,通过第 1 节所给的材料劣变过程重新建立了结构的能力与需求模型,且分别计算得到了桥梁结构在服役 20 年,40 年,60 年的主塔结构的地震易损性曲线. 图 13 分别给出了随着年份改变的 4 种损伤阶段的地震易损性曲线. 由图可知,对于每种损伤阶段的超越概率都随着结构服役时间的增加而增加. 在本例中,服役 20 年的结构的失效概率的增幅最大大约能够达到 20%,而服役 60 年则能够达到 40%. 因而在桥梁结构设计时,需要考虑随着服役年限增加而增加的地震风险。

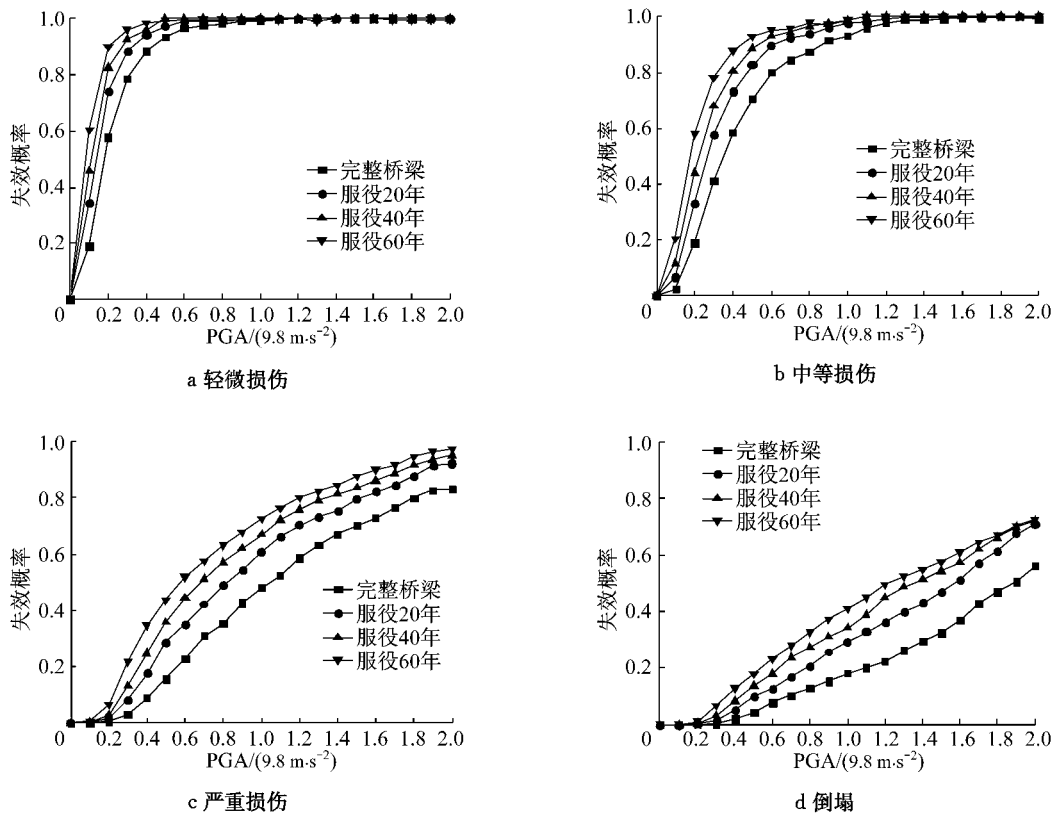


图 13 不同年份的地震易损性曲线
Fig. 13 The seismic fragility curves with different servicelives

4 结论

本文提供了一个计算考虑材料劣变影响的桥梁结构易损性分析方法. 由于寿命期内,桥梁结构时刻都受环境因素的影响,使得在分析时,要注意寿命期内的桥梁结构的性能演变规律. 本文在考虑材料劣变过程的基础上,结合 ANN-MC 方法来提高易损性分析的效率,并考虑结构自身的随机性,对桥梁结构进行了复合随机性的地震易损性分析,用地震易损

性的思路来探索结构的易损部位,从而方便后面在结构的易损性曲线基础上得到结构各个构件的损伤模式,来进行可靠度分析. 本文还通过一算例详细介绍了这个方法的分析过程. 本文的研究成果可为桥梁的全寿命设计、既有桥梁的运营以及地震风险评估等提供理论依据。

参考文献:

[1] Almusallam A A, Al-Gahtani A S, Aziz A R, et al. Effect of reinforcement corrosion on flexural behavior of concrete slabs

- [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1996, 8:123.
- [2] Mohammed T U, Hamada H, Yamaji T. Concrete after 30 years of exposure—part II: chloride ingress and corrosion of steel bars [J]. *ACI Materials Journal*, 2004, 101(1):13.
- [3] Choe D E, Gardoni P, Rosowsky D, et al. Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion [J]. *Reliability Engineering System Safty*, 2008, 93(3), 383.
- [4] Simon J, Bracci J M, Gardoni P. Seismic response and fragility of deteriorated reinforced concrete bridges [J]. *Journal of Structure Engineering*, 2010, 136(10), 1273.
- [5] Berto L, Vitaliani R, Saetta A, et al. Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena [J]. *Structural Safety*, 2009, 31:284.
- [6] Dekoster M, Buyle-Bodin F, Maurel O, et al. Modelling of the flexural behavior of RC beams subjected to localized and uniform corrosion [J]. *Engineering Structure*, 2003,25:1333.
- [7] Enright M, Frangopol D M. Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion [J]. *Engineering Structure*, 1998, 20(11):960.
- [8] 西安建筑科技大学. CECS 220:2007 混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- Xi'an University of Science and Technology Building. CECS 220: 2007 concrete structure durability evaluation criteria [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007.
- [9] Val D V, Pavel A T. Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion [J]. *Reliability Engineering System Safty*, 2008, 93(3). 91.
- [10] Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57(3), 135.
- [11] 冯清海. 特大桥梁地震易损性与地震风险概率分析[D]. 上海:同济大学桥梁工程系,2008.
- FENG Qinghai. Study on seismic vulnerability and risk probability analysis of super-large bridge [D]. Shanghai: Department of Bridge Engineering of Tongji University, 2008.
- [12] Kiremidjian A S, Bosöz N. Evaluation of bridge damage data from recent earthquakes [J]. *NCEER Bulletin*, 1997, 11(2): 1.
- [13] Shinozuka M, Feng M Q, Lee J H, et al. Statistical analysis of fragility curve [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2000, 126(12):1224.
- [14] Hwang H H M, Huo J R. Probabilistic seismic damage assessment of highway bridges [C]//The 6th US National Conference on Earthquake Engineering. Seattle: [s. n.], 1998:1028-1039.
- [15] Choi D E, DesRoches R, Nielson B. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. *Engineering Structure*, 2004, 26(2): 187.

~~~~~

(上接第 335 页)

- [6] Chai Y H. An analysis of the seismic characteristic of steel-jacketed circular bridge columns[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1996, 25: 149.
- [7] Zhang G W, Xiao Y, Kunnath S. Low-cycle fatigue damage of circular concrete-filled-tube columns [J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(2):151.
- [8] 邱法维, 杨卫东, 欧进萍. 钢管混凝土柱滞回耗能及累积损伤的实验研究[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1996, 29(3): 41.
- QIU Fawei, YANG Weidong, OU Jinping. Experiment studies on concrete filled Steel tube column hysteresis energy dissipation and cumulative damage[J]. *The Journal of Haerbin Architecture University*, 1996, 29(3): 41.
- [9] McCabe S L, Hall W J. Assessment of seismic structural damage[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115(9): 2166.
- [10] Park Y J, Ang A H S. Mechanic seismic damage model for reinforced concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 722.
- [11] 郭子雄, 吕西林. 高轴压比框架柱抗震性能试验研究[J]. *华侨大学学报*, 1999, 20(3): 258.
- GUO Zixiong, LÜ Xilin. Anti-seismic performance test of RC framed column with high axial compression ratio[J]. *Journal of Huaqiao University*, 1999, 20(3): 258.
- [12] 张伟平. 钢管混凝土柱在地震作用下的累积损伤性能研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2009.
- ZHANG Weiping. Research on cumulative seismic damage of CFT columns[D]. Changsha: College of Civil Engineering of Hunan University, 2009.
- [13] 杜喜凯. 往复荷载作用下钢管混凝土柱性能试验及理论分析[D]. 天津:天津大学建筑工程学院, 2010.
- DU Xikai. Experimental research and theoretical analysis of seismic behavior of concrete-filled steel tube beam-columns under cyclic loading[D]. Tianjin: School of Civil Engineering of Tianjin University, 2010.
- [14] Park Y J, Ang A H S. Seismic damage analysis of reinforced concrete building [J]. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 740.