

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231209001

## 考虑三维地震的劣化RC桥梁时变易损性分析\*

马亚飞, 董鑫, 黎翔, 何羽, 彭安银, 王磊

(长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:** 钢筋混凝土(RC)桥梁占我国桥梁总量90%以上,开展多灾害下RC桥梁易损性评估对保障路网安全意义重大。基于OpenSees平台建立了RC桥梁有限元计算模型,采用增量动力分析法对桥梁进行非线性时程分析,得到其不同强度地震作用下的地震响应值,并结合需求能力比对数回归分析研究了桥梁地震易损性;考虑氯离子侵蚀下钢筋时变退化机理,建立了RC构件的地震易损性曲面;在此基础上,基于二阶界限估计法,考虑构件之间的关联性,构建了RC桥梁系统时变地震易损性评估模型。研究结果表明:在氯离子侵蚀环境中,RC桥梁构件及系统的易损性随服役时间增加逐渐增大,桥梁系统的易损性均高于各桥梁构件;服役100年时,8度罕遇三维地震下,2#墩发生严重损伤的概率为12.5%,桥梁系统的损伤概率达18.5%。三维地震工况下桥梁构件和系统在各损伤状态的超越概率均高于一维地震工况;服役100年时,8度设防三维地震作用下,2#墩发生中等损伤的概率为22.4%,而一维地震下的损伤概率仅为2%。本研究可为全寿命期桥梁结构抗震性能优化设计与评估提供参考。

**关键词:** 桥梁工程; 时变易损性; 三维地震; 氯离子侵蚀; 增量动力分析

**中图分类号:** U442.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0593-09

## Time-varying Fragility Analysis of Deteriorating RC Bridges under Three-dimensional Earthquakes

MA Yafei, DONG Xin, LI Xiang, HE Yu, PENG Anyin, WANG Lei

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Reinforced concrete (RC) bridges account for more than 90% of the total number of bridges in China. It is of great significance to conduct the seismic fragility assessment of RC bridges under multi-hazard scenarios to ensure the safety of the transportation network. In this study, a finite element model of the RC bridge was established based on OpenSees. The nonlinear time-history analysis of the bridge was carried out using the Incremental Dynamic Analysis method, and the seismic response values under earthquakes of different intensities were obtained. Combined with the logarithmic regression analysis of the demand-to-capacity ratio, the seismic fragility of the bridge was analyzed. Furthermore, the time-varying degradation mechanism of reinforcement was considered under chloride ion erosion, and the seismic fragility surfaces of the RC components were established. On this basis, a time-varying seismic fragility assessment model for the RC bridge system was established using the second-order bound estimation method, considering the correlation among components. The results showed that the fragility of RC bridge components and systems gradually increased with service

\* 收稿日期:2023-12-08;修回日期:2024-01-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600900)、国家自然科学基金项目(52078055)、湖南省重点研发计划项目(2023GK2036)资助

作者简介:马亚飞(1984—),男,教授,博士。主要从事桥梁全寿命周期消危理论及应用研究。E-mail:yafei.ma@csust.edu.cn

time. The fragility of the bridge system was higher than that of each component. The probability of severe damage to pier 2# after 100 years under rare three-dimensional earthquake at 8-degree intensity was 12.5%, while that of the bridge system reached 18.5%. For all damage states, the exceedance probabilities of bridge components and the system under three-dimensional earthquakes were significantly higher than those under one-dimensional earthquakes. After 100 years of service, the probability of moderate damage to pier 2# under design-basis three-dimensional earthquake at 8-degree intensity was 22.4%, compared to just 2% under one-dimensional earthquake. This study can provide references for the optimization design and evaluation of seismic performance of bridge structures throughout their life cycle.

**Keywords:** bridge engineering; time-varying fragility analysis; three-dimensional earthquake; chloride ion erosion; Incremental Dynamic Analysis

## 0 引言

钢筋混凝土(RC)桥梁是我国交通网络的重要组成部分,保障其正常运营是社会经济活动正常进行的前提。然而,氯盐环境中RC桥梁内钢筋易发生锈蚀,结构性能随时间不断劣化<sup>[1]</sup>。当锈蚀损伤桥梁承受地震作用时,其抗震性能远低于完好桥梁,存在较大的安全隐患<sup>[2]</sup>。因此,需对服役期桥梁进行抗震性能评估,必要时采取合理维养措施,使桥梁保持正常使用功能和良好的抗震性能。

目前,桥梁抗震性能研究主要采用地震易损性分析法,该方法是一种基于概率理论的抗震性能评估方法,主要评估结构在不同强度地震作用下的损伤概率<sup>[3-4]</sup>。胡明亮<sup>[5]</sup>采用核密度估计法分析了高烈度区简支梁桥的地震易损性。E. A. Opabola等<sup>[6]</sup>结合易损性分析指出桥墩的损伤模式决定桥梁易损程度。S. Aldea等<sup>[7]</sup>建立了桥梁在原始设计和损伤修复后的易损性曲线,结果表明采取合理修复措施可提升桥梁抗震性能。上述易损性研究多假定服役期内桥梁性能保持不变,然而,氯离子引起钢筋锈蚀不仅会降低桥梁承载能力和延性<sup>[8]</sup>,还会改变结构动力特性<sup>[9-10]</sup>。J. L. Yan等<sup>[11]</sup>考虑氯离子侵蚀,提出了一种综合多种桥墩损伤指标的桥梁时变易损性分析方法。周救等<sup>[12]</sup>对混凝墩柱进行了拟静力加载试验,分析了氯离子侵蚀前后墩柱模型抗震性能的变化规律。杨国俊等<sup>[13]</sup>基于增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)的易损性分析方法,研究了氯离子侵蚀对RC桥墩抗震韧性的影响。X. L. Lu等<sup>[14]</sup>建立了考虑耐久性损伤的桥梁全寿命周期易损性曲线,揭示了氯离子侵蚀下结构劣

化对桥梁抗震性能的影响。

上述研究中地震荷载输入多围绕一维地震动开展,单一方向的地震动难以准确模拟实际地震作用,可能会低估桥梁损伤程度。实际地震运动为三维随机过程,三维地震动输入能更好地呈现桥梁受力变形特征,提高抗震性能评估的准确性。现有桥梁地震易损性研究对三维地震动输入关注较少,有必要开展三维地震输入下RC桥梁的时变抗震性能评估。

本文以一座四跨RC连续梁桥为研究对象,基于OpenSees平台建立了三维地震下桥梁非线性空间有限元模型,研究了氯离子侵蚀对RC桥梁抗震能力和地震需求的影响,建立了桥梁构件和系统服役期内时变易损性曲线,可为桥梁抗震性能优化设计与评估提供参考。

## 1 桥梁时变地震易损性

### 1.1 地震易损性分析法

结构地震易损性分析用以表征不同强度等级地震作用下,构件或结构的地震需求超过对应损伤极限状态抗震能力的概率。易损性分析中常假定地震需求和抗震能力服从对数正态分布<sup>[15]</sup>,即:

$$P_f = P[D \geq C|IM] = \Phi\left(\frac{\ln(S_d/S_c)}{\sqrt{\beta_{DIM}^2 + \beta_C^2}}|IM\right) \quad (1)$$

式中, $IM$ 为地震动强度参数; $D$ 为地震需求,即构件或结构地震响应值; $C$ 为抗震能力,即构件或结构达到各级破坏状态的临界值; $S_d$ 和 $S_c$ 为结构地震需求和抗震能力的均值; $\beta_{DIM}$ 为地震需求在给定 $IM$ 作用下的条件对数标准差; $\beta_C$ 为结构抗震能力的对数标准差。

本文采用需求能力比对数回归法建立桥梁的易损性曲线,基于IDA法进行非线性分析获得桥梁地震响应。确定损伤指标后,对结构地震需求参数和地震强度参数进行数据回归<sup>[6]</sup>,可建立结构易损性函数:

$$P_f = P\left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1\right] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(1) - \mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) \quad (2)$$

式中, $\mu$ 和 $\sigma$ 为结构需求能力比的对数均值和对数标准差。

考虑氯离子侵蚀对钢筋性能的影响,结构地震需求和抗震能力随服役时间不断退化,易损性函数也随服役时间变化,桥梁结构的时变易损性函数可表示为:

$$P_f = P\left[\frac{S_d(t)}{S_c(t)} \geq 1\right] = \Phi\left[\frac{\mu(t)}{\sigma(t)}\right] \quad (3)$$

$$\mu(t) = a(t) [\ln(IM)]^2 + b(t) \ln(IM) + c(t) \quad (4)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{S_r(t)/(n-2)} \quad (5)$$

$$S_r(t) = \sum_{i=1}^n [y_i(t) - \mu_i(t)]^2 \quad (6)$$

式中, $a(t)$ 、 $b(t)$ 和 $c(t)$ 为 $t$ 时刻对应的回归参数; $S_r(t)$ 为 $t$ 时刻回归曲线的残差平方和。

图1为桥梁服役期地震易损性分析框架。首先,基于OpenSees建立桥梁有限元模型,开展地震需求和抗震能力分析,建立地震易损性评估模型;进一步考虑氯离子侵蚀下材料性能退化机理,对建

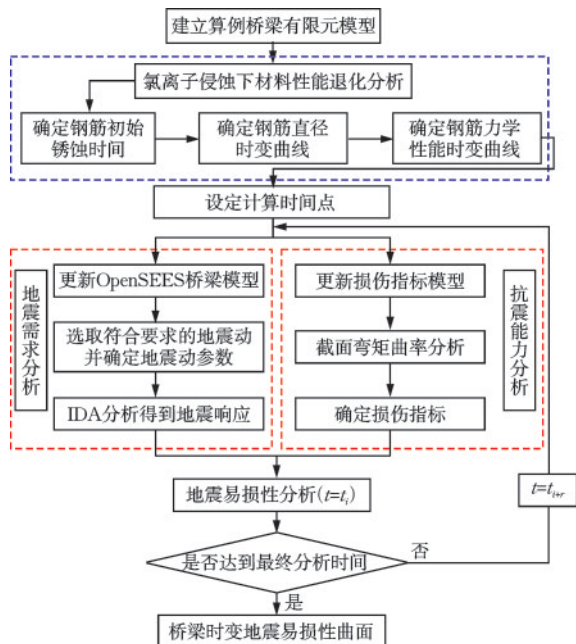


图1 时变地震易损性分析框架

Fig.1 Framework of time-varying seismic fragility analysis

模参数和损伤指标进行更新,建立桥梁服役期内时变地震易损性曲面。

## 1.2 氯离子侵蚀效应

### 1.2.1 氯离子侵蚀机理模型

氯离子侵蚀下,RC桥梁内钢筋会发生锈蚀,锈蚀产物堆积引发混凝土保护层开裂剥落,进一步加速氯离子渗入<sup>[16-17]</sup>。氯离子扩散过程可采用Dura-crete模型描述<sup>[18]</sup>:

$$C(x,t) = C_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}}\right)\right] \quad (7)$$

式中, $x$ 为距离钢筋表面的深度; $t$ 为服役时间; $D_c$ 为扩散系数; $C_s$ 为混凝土表面氯离子浓度; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数。

由于RC构件内外存在浓度差,氯离子沿混凝土表面向内扩散,钢筋表面氯离子浓度达到阈值,钢筋开始锈蚀。钢筋锈蚀初始时间可表示为<sup>[18]</sup>:

$$T_{\text{cor}} = \left\{ \frac{d_c^2}{4D_c} \left[ \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{C_s - C_{\text{cr}}}{C_s}\right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (8)$$

式中, $d_c$ 为保护层厚度; $C_{\text{cr}}$ 为临界氯离子浓度。

### 1.2.2 钢筋性能退化模型

锈蚀导致钢筋截面积减小, $t$ 时刻钢筋直径可表示为<sup>[19-20]</sup>:

$$d_s(t) = \begin{cases} d_{s0}, & t \leq T_{\text{cor}} \\ d_{s0} - 2\lambda_{c1}(t - T_{\text{cor}}), & T_{\text{cor}} \leq t \leq T_{\text{cr}} \\ d_{s0} - 2\lambda_{c1}(T_{\text{cr}} - T_{\text{cor}}) - 2\lambda_{c11}(t - T_{\text{cr}}), & t \geq T_{\text{cr}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $d_{s0}$ 、 $d_s(t)$ 分别为锈蚀前后钢筋直径; $T_{\text{cr}}$ 为混凝土保护层开裂时间; $\lambda_{c1}$ 和 $\lambda_{c11}$ 分别为开裂前后钢筋锈蚀速率。

钢筋锈蚀过程中,强度、延性等力学特性随时间变化规律可分别表示为<sup>[21]</sup>:

$$f_y(t) = [1.0 - \beta_y \eta_s(t)] f_{y0} \quad (10)$$

$$f_u(t) = [1.0 - \beta_u \eta_s(t)] f_{u0} \quad (11)$$

$$E(t) = [1.0 - 1.166 \eta_s(t)] E_s \quad (12)$$

式中, $f_y(t)$ 、 $f_u(t)$ 为锈蚀后钢筋的屈服、极限强度; $f_{y0}$ 、 $f_{u0}$ 为钢筋的初始屈服、极限强度; $\beta_y$ 、 $\beta_u$ 为钢筋屈服、极限的折减系数; $E_s$ 和 $E(t)$ 为锈蚀前后钢筋的弹性模量; $\eta_s(t)$ 为钢筋锈蚀率,可表示为:

$$\eta_s(t) = 1 - \left[ \frac{d_s(t)}{d_{s0}} \right]^2 \quad (13)$$

式中,  $d_{s0}$  和  $d_s(t)$  分别为锈蚀前后的钢筋直径。

## 2 桥梁建模和地震动记录选取

### 2.1 有限元建模

本研究以一座  $4 \times 35$  m 的 RC 连续梁桥为对象进行分析,如图 2(a)所示,主梁采用混凝土单箱双室箱梁;桥墩为双柱墩,墩柱直径 1.5 m,墩高 9.0 m,两墩柱中心距 7.3 m。主梁和桥墩均采用 C50 混凝土,桥墩截面采用 32 根直径为 32 mm 的 HRB335 钢筋,纵筋配筋率为 1.46%;箍筋采用直径为 12 mm 的 HRB335 环形箍筋,间距 100 mm;桥墩保护层厚度为 55 mm,全桥采用盆式橡胶支座。

基于 OpenSees 平台建立全桥的三维非线性有限元模型,主梁采用弹性梁柱单元,单元长度为 5 m,上部结构的质量转化为集中质量施加在主梁节点上。地震作用下桥墩可能发生延性破坏,考虑其弹塑性变形,墩柱采用基于纤维模型的非线性梁柱单元,单元长度为 1 m,纤维截面划分如图 2(b)所示。核心区混凝土和保护层混凝土均采用 Concrete 01 模型,其中核心区混凝土需考虑箍筋约束作用,采用 Mander 模型,如图 2(c)所示。图中,  $f'_{c0}$  表示保护层混凝土的峰值应力,  $f'_{cc}$  表示核心混凝土的峰值应力。钢筋采用 Steel 02 模型,如图 2(d)所示。支座采用 Elastomeric Bearing (Plasticity) 单元进行模拟,单元长度为零,支座恢复力模型如图 2(e)所示,图中,  $F_{\max}$  为临界滑动摩擦力,  $x_y$  为临界滑动位移。本文不考虑基础弹性变形的影响,仅在桥墩底部施加固定约束。

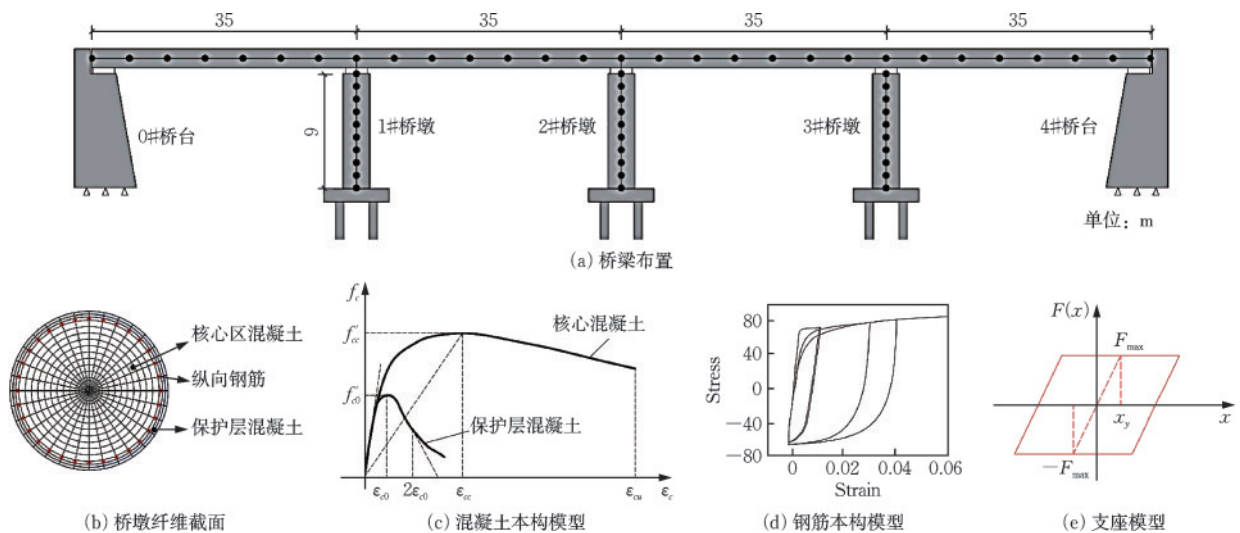


图2 桥梁布置及有限元模型

Fig.2 Bridge layout and finite element model

### 2.2 地震动记录

地震动具有较大的随机性和不确定性,合理选择地震动是准确开展易损性分析的前提。该桥处于二类场地,抗震设防烈度为 8 度,设计地震分组为第一组,设计基本地震加速度为  $0.20g$ 。在美国太平洋地震研究中心 (PEER) 强震数据库中选取 20 条断层距大于 10 km 的地震动记录,所选地震动的反应谱如图 3 所示。由图 3 可知,所选地震动记录均值反应谱与目标谱吻合良好,持时均大于结构基本周期的 5 倍以上,表明所选地震动可适用于该桥非线性时程分析。

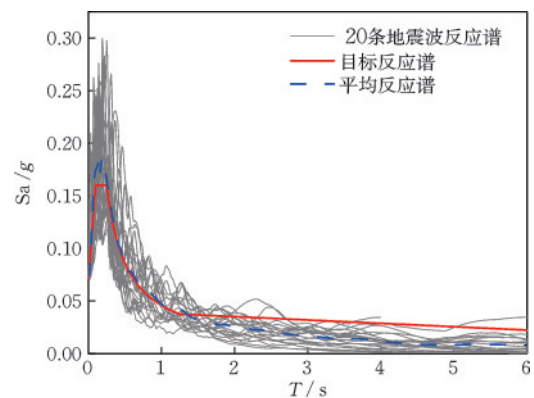


图3 地震波反应谱曲线

Fig.3 Response spectrum curves of seismic waves

### 3 桥梁时变地震易损性评估

#### 3.1 损伤指标

在地震易损性分析中,损伤指标是划分损伤等级与损伤状态的依据。本文根据美国震灾评估软件 HAZUS<sup>[20]</sup>,将桥梁损伤状态分为4个等级:轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤。抗震设计中通常采用曲率表征桥墩的变形能力,由于地震作用下桥墩破坏主要位于墩底塑性铰区,故本文选取墩底截面曲率作为衡量桥墩损伤的指标<sup>[22]</sup>,见表1。使用 XTRACT 截面分析软件分析不同服役时刻墩底截面的弯矩-曲率,可得到桥墩时变损伤指标,见表2。由表2可知,桥墩损伤指标随服役时间的增加逐渐增大。与新建时相比,服役50年和100年时,等效屈服曲率分别增加了16.1%和63.6%。这是由于受氯离子侵蚀影响,钢筋屈服强度随服役时间逐渐减小,致使等效屈服曲率逐年增加。此外,截

表1 桥墩损伤状态及损伤指标描述

Table 1 Description of damage states and damage indices of bridge piers

损伤状态	损伤状态描述	损伤指标
轻微损伤	外缘钢筋首次屈服	$\phi_{cy1} < \phi \leq \phi_{cy}$
中等损伤	控制截面塑性铰形成	$\phi_{cy} < \phi \leq \phi_c$
严重损伤	墩柱出现严重能力退化	$\phi_c < \phi \leq \phi_{max}$
完全损伤	核心区混凝土压碎或受拉钢筋达极限拉应变	$\phi > \phi_{max}$

注: $\phi_{cy1}$ 为钢筋首次屈服的曲率, $\phi_{cy}$ 为等效屈服曲率, $\phi_c$ 为截面最大弯矩的曲率, $\phi_{max}$ 为混凝土达到极限压应变的曲率

面极限曲率,即混凝土达到极限压应变,也随服役时间逐渐增大。这是由于数值模型未考虑箍筋锈蚀,箍筋约束下混凝土抗压强度未随时间增加而降低,从而使混凝土截面受压区面积减小,曲率增加。

支座损伤采用相对位移进行衡量<sup>[23]</sup>,不同状态下的损伤指标见表3。不考虑支座耐久性损伤,以及桥墩时变损伤对支座位移的影响,分析支座的时变易损性。

表2 桥墩时变损伤指标

Table 2 Time varying damage indices of bridge piers

单位:( $\times 10^{-3}$ )/m

损伤指标	0年	10年	20年	30年	40年	50年	60年	70年	80年	90年	100年
$\phi_{cy1}$	1.568	1.568	1.574	1.651	1.749	1.854	1.975	2.12	2.281	2.48	2.722
$\phi_{cy}$	2.309	2.309	2.339	2.412	2.545	2.68	2.835	3.019	3.225	3.478	3.777
$\phi_c$	26.47	26.47	26.65	27.27	28.36	28.8	30.11	31.63	33.71	35.41	39.89
$\phi_{max}$	52.96	52.96	53.05	53.6	54.51	56.71	58.97	60.93	63.07	65.27	67.45

表3 支座损伤指标

Table 3 Damage indices of bearings

损伤状态	损伤指标/mm
轻微损伤	100
中等损伤	150
严重损伤	200
完全损伤	250

#### 3.2 桥梁构件时变易损性分析

##### 3.2.1 需求能力比IDA曲线

选取PGA(地面峰值加速度)作为地震动强度参数,采用等步长法对其进行调幅,调幅范围为0~1.2g,调幅步长为0.1g。一维地震工况下仅输入顺桥向地震动;在三维地震工况下,以1:0.85:0.65的PGA比值分别输入顺桥向、横桥向和竖桥向地

震动<sup>[24]</sup>。

图4为2#墩墩底截面新建时在一维地震作用下的需求能力比IDA曲线。由图4可知,当地震强度较小时( $PGA < 0.3g$ ),IDA曲线随地震强度近似呈线性变化;随地震强度增加,IDA曲线不再保持线性,这表明桥墩出现损伤,进入塑性发展阶段。不同地震动下的IDA曲线在PGA较小时离散性较小,而在进入塑性阶段后离散性明显增大,这表明地震动随机性引起的桥梁结构地震响应差异主要表现在弹塑性阶段。可以看出不同损伤状态的拟合方程二次项与一次项系数相同,差异主要集中在截距项,这说明各损伤的变化趋势大致相同。回归分析所得的回归系数,结合第1.1节中关于地震易损性曲线的建立方法,即可建立构件在不同服役时间点的地震易损性曲线。

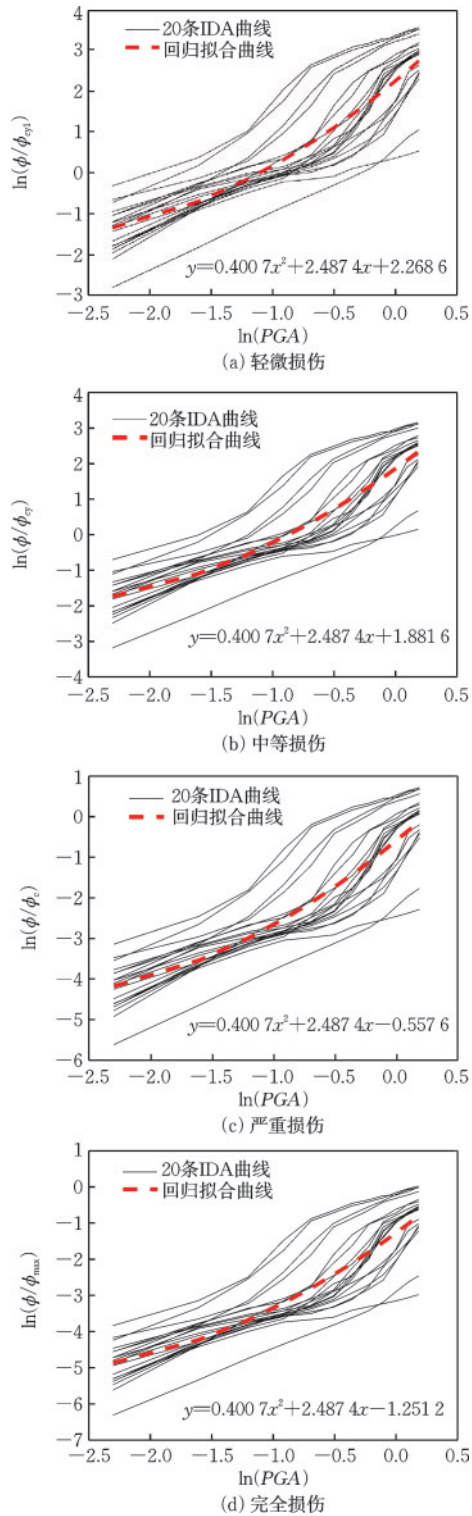


图4 2#墩墩底截面 IDA 曲线

Fig.4 IDA curves of pier 2# bottom cross-section

### 3.2.2 构件时变易损性分析

该桥设计使用年限为100年,本研究以10年为时间间隔,采用式(7)~式(13)提出的桥梁性能参数退化模型,建立桥梁构件服役100年的时变地震易损性曲面。

图5为2#墩不同损伤状态下易损性曲面。由图5可知,随服役时间增加,桥墩在不同损伤状态下的超越概率及增幅均明显增大。三维8度设防地震( $PGA=0.2g$ )下,2#墩在新建时发生轻微损伤的超越概率为41.5%,服役100年时达57.5%,增幅16%。三维8度罕遇地震( $PGA=0.4g$ )下,2#墩服役10年、20年、50年、70年和100年时发生完全损伤的超越概率分别为0.36%、0.42%、1.66%、2.76%和5.49%,最大增幅5.13%。

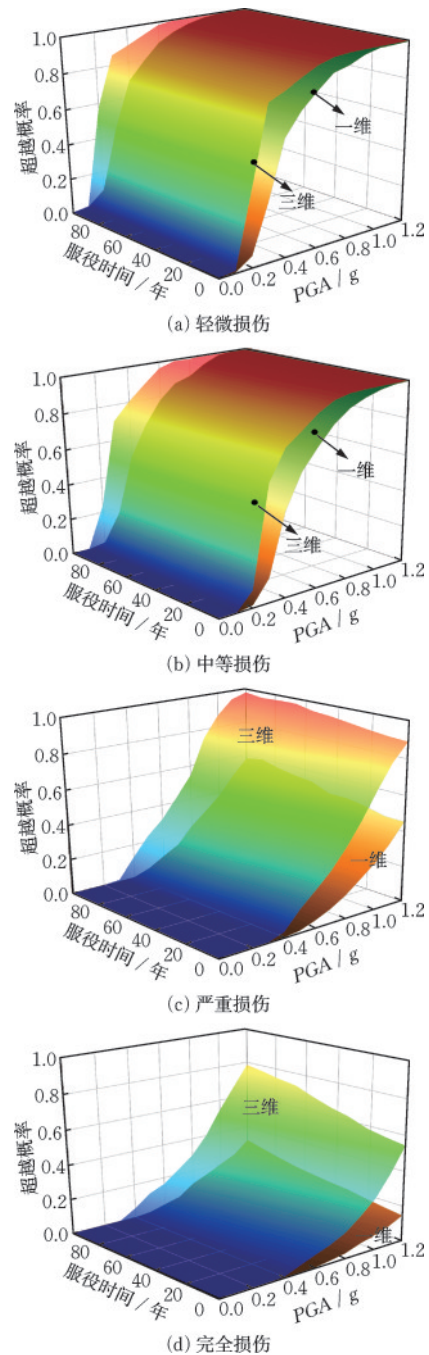


图5 2#墩时变地震易损性曲面

Fig.5 Time-varying seismic fragility surfaces of pier 2#

由图5可知,三维地震下桥墩不同损伤状态下超越概率均高于一维地震。当输入一维工况时,在8度设防地震下,服役100年时,2#墩发生轻微损伤的超越概率为9%,三维地震下的超越概率为57.5%,相比一维工况下高出48.5%。8度罕遇地震下,2#墩均未发生严重损伤和完全损伤,在三维地震下,2#墩服役10年发生完全损伤的概率达0.36%。

图6为PGA=0.4g时0#桥台支座和1#墩支座在不同损伤下的时变超越概率分布。8度罕遇地震下,0#桥台支座和1#墩支座发生损伤的概率随服役时间增加而增大,且在服役期内易发生轻微损伤和中等损伤,发生严重损伤和完全损伤的概率较低。0#桥台支座和1#墩支座在两种地震工况下,相同服役时间发生相同损伤的概率相差小于1%。

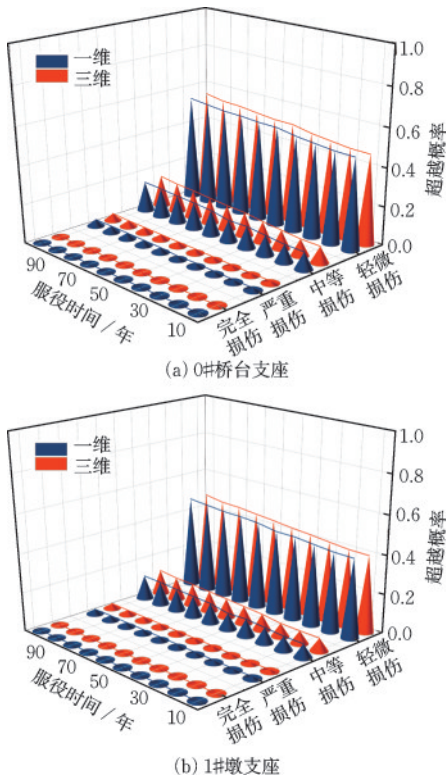


图6 PGA=0.4g时变超越概率分布

Fig.6 Distribution of time-varying exceedance probabilities under PGA=0.4g

### 3.3 桥梁系统时变易损性分析

桥梁结构由不同构件组成,各构件间并非完全独立,结构整体抗震性能与构件抗震性能密切相关,构件发生破坏均可能引发桥梁整体破坏。本节采用二阶界限估计法对桥梁系统的地震易损性进行分析<sup>[25]</sup>。二阶界限估计法基于概率论原理,考虑结构体系中失效模式间的相互影响,划定结构体系失效概率的上、下限,其计算表达式为:

$$P_{\rho} + \sum_{i=2}^n \max \left( P_{\rho} - \sum_{j=1}^{i-1} P_{f_{ij}}, 0 \right) \leq P_f \leq \sum_{i=1}^n P_{\rho} - \sum_{i=2}^n \max (P_{f_{ij}}) \quad (14)$$

式中, $P_{\rho}$ 为最易损构件失效概率; $P_{\rho}$ 为第*i*个构件失效概率( $i \neq 1$ ); $P_{f_{ij}}$ 为构件*i*和*j*同时失效的概率。

由于二阶界限估计法上下界较接近,部分上下界带宽甚至为0,为保证桥梁震后的使用功能,提高安全性,本文采用系统易损性上界对桥梁系统时变易损性进行分析,如图7所示。

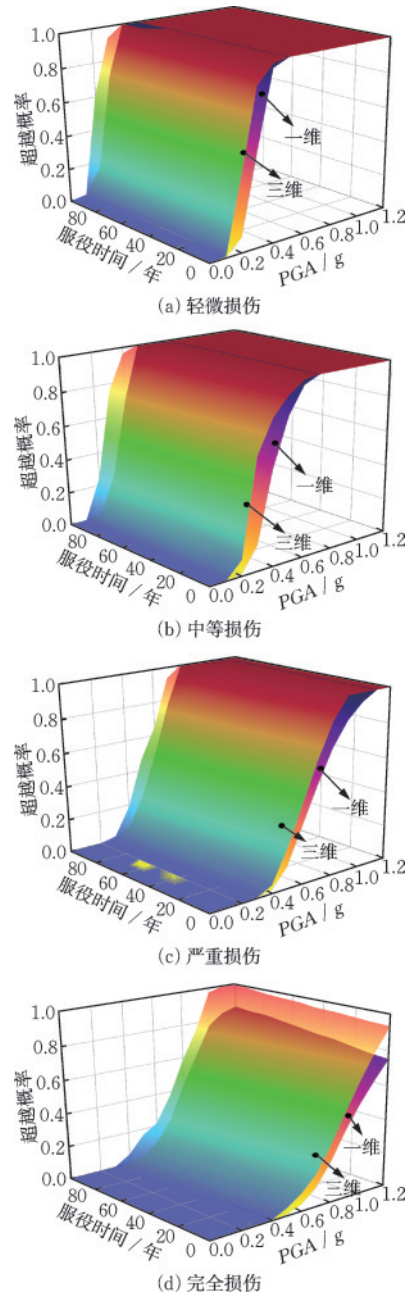


图7 桥梁系统时变地震易损性曲面

Fig.7 Time-varying seismic fragility surfaces of bridge system

由图7可知,在三维和一维地震作用下,桥梁系统易损性随服役年限增加而增大,三维地震下桥梁系统各损伤状态的超越概率均高于一维地震。8度设防地震下,100年服役期时桥梁系统在两种输入工况下均未发生严重损伤和完全损伤,而三维地震下发生轻微损伤(61.3%)和中等损伤(24.5%)的概率远大于一维地震(16.3%和2.3%)。三维8度罕遇地震作用下桥梁系统发生轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全损伤的超越概率分别为100%、96.2%、18.5%和5.8%;在一维地震下,发生相同损伤的超越概率分别为100%、68.8%、6.3%和0.3%。

表4给出了服役100年时,桥梁系统和构件达严重损伤状态的PGA中位值,即损伤状态概率50%对应的PGA。由表4可知,三维地震作用下,桥梁系统严重损伤状态下的PGA中位值为0.54g,其他构件在严重损伤状态下的PGA中位值均大于0.78g(偏大约44.4%),说明桥梁系统的易损性高于桥梁构件,易损性分析中要重视桥梁整体的分析。此外,一维地震作用下,0#桥台支座的中位值为0.81g,2#桥墩的中位值为1.15g,说明支座比桥墩更易发生严重损伤,在桥梁抗震设计时应加强支座减隔震性能。

表4 桥梁结构严重损伤对应PGA中位值  
Table 4 Median value of PGA corresponding to severe damage states of bridge structure 单位:g

	系统	2#墩	0#桥台支座	1#墩支座
一维	0.64	1.15	0.81	0.85
三维	0.54	0.78	0.8	0.83

## 4 结论

(1) 钢筋锈蚀引起RC构件抗力退化,桥墩承载能力下降,等效屈服曲率随服役时间增加,本算例计算结果表明,与新建时相比,服役50年和100年时,桥墩等效屈服曲率分别增加了16.1%和63.6%。

(2) 随服役时间增加,桥梁在不同损伤状态下的超越概率不断增大,三维8度罕遇地震作用下,2#墩服役100年发生完全损伤的概率为5.49%,较新建时增加5.13%。

(3) 三维地震下桥梁构件损伤超越概率明显大于一维地震。桥梁服役100年时,8度设防三维地震作用下,2#墩和桥梁系统发生中等损伤的概率分别

为22.4%和24.5%,而一维地震下的损伤概率仅为2%和2.3%,进行桥梁抗震性能评估时应采用三维地震输入。

(4) 桥梁系统的易损性均高于各桥梁构件,8度罕遇三维地震下,桥梁服役100年时,2#墩、0#桥台支座和1#墩支座发生严重损伤的概率分别为12.5%、3.7%和2.9%,而桥梁系统的严重损伤概率达到18.5%。桥梁抗震性能设计与评估中需加强整体易损性分析。

本文研究了混凝土桥梁服役期内地震易损性,但建模时未考虑箍筋腐蚀对截面性能以及桥梁抗震能力的影响。实际桥梁腐蚀程度和位置随机性显著,尚需进一步结合实桥检测数据对数值模型进行修正。此外,如何利用先进传感技术和人工智能手段建立桥梁全寿命期智慧运维数字孪生系统,实现桥梁多灾害智能评估与维修决策优化尚需深入。

## 参考文献:

- [1] 李克非,廉慧珍,邸小坛.混凝土结构耐久性设计原则、方法与标准[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 64-71, 96.  
Li K F, Lian H Z, Di X T. Durability design of concrete structures: principle, method and standard [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 64-71, 96. (in Chinese)
- [2] 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(2): 303-316.
- [3] Dizaj A E, Salami M R, Kashani M M. Nonlinear dynamic behaviour and seismic fragility analysis of irregular multi-span RC bridges [J]. Structures, 2022, 44: 1730-1750.
- [4] 方圣恩,唐永久. 隔震与非隔震支座对混凝土箱梁桥地震易损性的影响[J]. 地震工程学报, 2021, 43(6): 1368-1376.  
Fang S E, Tang Y J. Seismic fragility of a concrete box-girder bridge with and without isolation bearings [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1368-1376. (in Chinese)
- [5] 胡明亮. 基于KDE的高烈度区典型简支梁桥地震易损性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 198-207.  
Hu M L. Seismic fragility of typical simply supported bridge using kernel density estimation in high seismicity

- region[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(1): 198-207. (in Chinese)
- [6] Opabola E A, Mangalathu S. Seismic fragility assessment of bridges with as-built and retrofitted splice-deficient columns[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 21(1): 583-603.
- [7] Aldea S, Bazaez R, Astroza R, et al. Seismic fragility assessment of Chilean skewed highway bridges[J]. Engineering Structures, 2021, 249: 113300.
- [8] Dizaj A E, Salami M R, Kashani M M. Seismic vulnerability analysis of irregular multi-span concrete bridges with different corrosion damage scenarios[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 165: 107678-107692.
- [9] 江辉, 谷琼, 黄磊, 等. 考虑氯离子侵蚀时变劣化效应的近海斜拉桥地震易损性分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 38-45.  
Jiang H, Gu Q, Huang L, et al. Analysis on seismic vulnerability of offshore cable-stayed bridge considering time-dependent deterioration by chloride-induced corrosion[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(1): 38-45. (in Chinese)
- [10] Dey A, Sil A. Advanced corrosion-rate model for comprehensive seismic fragility assessment of chloride affected RC bridges located in the coastal region of India [J]. Structures, 2021, 34: 947-963.
- [11] Yan J L, Guo A X, Li H. Comparative analysis of different types of damage indexes of coastal bridges based on time-varying seismic fragility[J]. Marine Structures, 2022, 86(5): 103288.
- [12] 周牧, 张洋, 姜永存, 等. 氯离子侵蚀后桥墩的抗震性能及损伤指标研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 263-272.  
Zhou M, Zhang Y, Jiang Y C, et al. Aseismic performance and damage index of pier after chloride ion erosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 263-272. (in Chinese)
- [13] 杨国俊, 叶苏, 李喜梅. 考虑氯离子侵蚀下的RC桥墩时变抗震韧性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(8): 60-66.  
Yang G J, Ye S, Li X M. Time-dependent seismic resilience analysis of RC bridge piers considering chloride induced corrosion[J]. Journal of Hua Zhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(8): 60-66. (in Chinese)
- [14] Lu X L, Wei K, He H F, et al. Life-cycle seismic fragility of a cable-stayed bridge considering chloride-induced corrosion[J]. Earthquake Engineering and Resilience, 2022, 1(1): 60-72.
- [15] 万华平, 卫志成, 苏雷, 等. 考虑桩径效应的桥梁结构地震风险分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 224-231.  
Wan H P, Wei Z C, Su L, et al. Seismic risk analysis of bridge structure considering pile diameter effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 224-231. (in Chinese)
- [16] 李宏男, 董皓璐, 李超, 等. 基于全寿命周期抗震性能的桥梁结构维修决策方法研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 1-14.  
Li H N, Dong H L, Li C, et al. Research progress on life-cycle performance-based seismic maintenance decision method for bridge structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 1-14. (in Chinese)
- [17] Ghazal H, Mwafy A. Seismic fragility assessment of an existing multi-span RC bridge equipped with risk mitigation systems[J]. Buildings, 2022, 12(7): 982-1008.
- [18] Duracrete. Statistical quantification of the variables in the limit state functions[M]. Whangarei, Newzealand: DuraCrete, 2000.
- [19] 既有混凝土结构耐久性评定标准: GB/T 51355—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [20] 梁岩, 闫士昌, 陆尧, 等. 近海高速铁路桥梁时变地震易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1248-1256.  
Liang Y, Yan S C, Lu Y, et al. Time-varying seismic fragility analysis of offshore high-speed railway bridges [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1248-1256. (in Chinese)
- [21] Clark L A, Chan A H C, Du Y G. Residual capacity of corroded reinforcing bars[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(3): 135-147.
- [22] Shi Y, Xiong L J, Qin H G, et al. Seismic fragility analysis of LRB-isolated bridges considering the uncertainty of regional temperatures using BP neural networks [J]. Structures, 2022, 44: 566-578.
- [23] Zhong H Q, Yuan W C, Dang X Z, et al. Seismic performance of composite rubber bearings for highway bridges: Bearing test and numerical parametric study [J]. Engineering Structures, 2022, 253: 113680.
- [24] 建筑与市政工程抗震通用规范: GB/T 55002—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [25] Christensen P T, Murotsu Y. Application of structural systems reliability theory [M]. Springer, Berlin: Heidelberg, 1986.

(本文编辑:张艺)