

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220220001

近海高速铁路桥梁时变地震易损性分析*

梁岩, 闫士昌, 陆尧, 李亮亮

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为研究近海环境下耐久性损伤对高速铁路桥梁地震易损性的影响, 通过建立高速铁路多跨刚构桥 OpenSEES 非线性有限元模型, 考虑近海环境下高速铁路桥梁服役年限内钢筋锈蚀及其与混凝土黏结滑移性能退化, 基于 IDA 方法进行非线性时程分析, 确定桥梁各构件损伤指标并建立其时变地震易损性曲线; 基于二阶界限法, 考虑各构件相关性, 进行高速铁路桥梁系统时变地震易损性分析。结果表明: 全寿命周期内, 近海高速铁路桥梁系统时变地震易损性随服役年限延长而增大, 轻微损伤的超越概率随服役时间变化明显; 随着损伤加剧, 各状态的超越概率随服役时间延长变化减小; 以服役 100 年为例, 高速铁路桥梁系统在 8 度罕遇地震作用下发生轻微损伤、中等损伤、严重损伤及完全破坏的超越概率分别为 97.5%、91.6%、21.5%、1.4%, 分别比新建时增大了 5.3%、15.1%、11.1%、1%。

关键词: 桥梁; 高速铁路; 耐久性损伤; 时变地震易损性

中图分类号: U442.5⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1248-09

Time-varying Seismic Fragility Analysis of Offshore High-Speed Railway Bridges

LIANG Yan, YAN Shichang, LU Yao, LI Liangliang

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the impact of durability damage on the seismic fragility of high-speed railway bridges in offshore environments, this paper builds a nonlinear finite element model of high-speed railway multi-span continuous rigid frame bridges based on the OpenSEES finite element platform, considering the corrosion and bond slippage of steel bars within the service life of high-speed railway bridges in offshore environments. The IDA method is used for nonlinear time-history analysis to determine the damage index and the seismic fragility curve of each component of the bridge. Based on the second-order limit method, and considering the relevance of each component, the time-varying seismic fragility analysis of the high-speed railway bridge system is carried out. Studies show that the time-varying seismic fragility of offshore high-speed railway bridge systems increases with the extension of service life in the full life cycle, and the exceedance probability of minor damage changes significantly with the time of service; as the damage intensifies, the exceedance probability of each state

* 收稿日期: 2022-02-20; 修回日期: 2022-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(51608488)、河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(212102310268)、郑州大学青年骨干教师项目(2121ZDGGJS008)资助

作者简介: 梁岩(1986—), 男, 副教授, 博士。主要从事桥梁结构抗震及耐久性研究。E-mail: liangyan@zzu.edu.cn

通讯作者: 陆尧(1988—), 男, 讲师, 博士。主要从事桥梁复杂受力分析研究。E-mail: luyao@zzu.edu.cn

decreases with the extension of service time; taking 100 years of service as an example, the exceedance probability of minor damage, moderate damage, severe damage and complete failure of the bridge system under the action of a rare earthquake of intensity 8 is 97.5%, 91.6%, 21.5%, and 1.4%, respectively, increasing by 5.3%, 15.1%, 11.1%, and 1% respectively compared with the newly built bridge system.

Keywords: bridge; high-speed railway; durability damage; time-varying seismic fragility

引言

我国高速铁路总运营里程达 3.79 万 km^[1], 其中桥梁 3 万余座。沿海通道是我国“八纵八横”高速铁路网的主通道之一, 我国震区高速铁路桥梁分布广泛, 近海震区高速铁路桥梁由于其腐蚀环境的影响, 全寿命周期内面临的地震安全问题更为严重。

目前, 国内外学者对于桥梁抗震性能开展了大量研究, 地震易损性可有效评估桥梁在不同强度地震作用下发生不同破坏模式的失效概率。吴文朋等^[2]总结了桥梁结构地震易损性常用研究方法。成虎等^[3]考虑氯离子侵蚀引起的纵筋力学性能衰减及黏结滑移退化, 研究了不同腐蚀工况下钢筋混凝土桥墩的地震易损性。户东阳^[4]以渝昆高速铁路某非规则连续梁桥为例, 研究了减隔震支座对桥梁制动墩地震易损性的影响。魏标等^[5]研究了高速铁路轨道精细化建模对高铁桥梁地震易损性的影响, 发现轨道精细化建模程度对支座、桥墩等构件的地震易损性影响较小。F.K.Cui 等^[6]为评估近海混凝土桥梁下部结构的时变地震易损性, 提出一种改进的钢筋劣化模型, 并对某三跨连续箱梁桥进行了概率地震易损性分析。J.Ghosh 等^[7]考虑了氯离子引起的钢筋混凝土柱和钢支座腐蚀, 研究了氯化物除冰盐环境对多跨连续公路桥梁抗震性能的影响。M. Blomfors 等^[8]提出了一种考虑横截面中钢筋位置的黏结滑移模型, 提高了锈蚀钢筋混凝土结构黏结应力评估的准确性。近海环境下, 氯离子含量较高, 服役期内材料力学性能发生退化, 其地震易损性会随服役时间发生变化, 即为时变地震易损性^[9]。本课题组考虑氯离子侵蚀及混凝土碳化, 研究了多跨刚连续梁桥时变地震易损性及抗倒塌性能^[10-11]。

目前, 国内外学者在桥梁易损性方面研究成果主要集中于公路桥梁。相比于公路桥梁, 高速铁路桥梁墩柱截面较大, 配筋率一般较低, 其震害影响更为严重。随着我国新建近海高速铁路不断投入

运营, 受近海腐蚀性环境的影响, 高速铁路桥梁工作性能随服役年限的延长而逐渐退化, 目前对于近海高速铁路桥梁时变地震易损性的研究尚不充分。本文以某近海四跨高速铁路刚构桥为例, 基于 OpenSEES 平台建立有限元模型, 考虑服役年限内钢筋锈蚀及其与混凝土黏结滑移性能退化, 依据桥梁场地条件选取地震波, 对桥梁各构件及系统进行时变地震易损性分析。

1 近海高速铁路桥梁材料力学性能损伤因素分析

近海环境下, 由于氯离子的侵蚀作用, 钢筋易发生锈蚀, 进而导致其与混凝土黏结滑移性能退化, 并影响桥梁抗震性能^[12], 此时混凝土碳化对桥梁抗震性能的影响较小, 不予考虑。根据高速铁路桥梁的设计使用年限, 选取高速铁路桥梁服役 0、50、70、100 年四个服役期进行地震易损性分析。

1.1 近海环境下耐久性损伤因素分析

根据近海桥梁所处环境类别, 参考《既有混凝土结构耐久性评定标准》^[13], 选取钢筋锈蚀模型, 锈蚀钢筋的直径、屈服强度和极限强度由式(1)~(4)确定^[14]:

$$d_s = \begin{cases} d & t \leq t_i \\ d - 2\lambda_{cl}(t - t_i) & t_i \leq t \leq t_{cr} \\ d - 2\lambda_{cl}(t_{cr} - t_i) - 2\lambda_{cII}(t - t_{cr}) & t \geq t_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

式中, d 、 d_s 分别为锈蚀前后钢筋的直径; λ_{cl} 、 λ_{cII} 分别为混凝土保护层开裂前后钢筋的年锈蚀速率; t_i 为钢筋开始锈蚀时间; t_{cr} 为保护层混凝土开裂时间。

$$f_y = (1 - \beta_y Q_{corr}) \times f_{y0} \quad (2)$$

$$f_u = (1 - \beta_u Q_{corr}) \times f_{u0} \quad (3)$$

$$Q_{corr} = 1 - \left(\frac{d_s}{d}\right)^2 \quad (4)$$

式中, Q_{corr} 为钢筋锈蚀率; f_y 、 f_u 分别为锈蚀后钢筋的

屈服强度、极限强度; f_{y0} 、 f_{u0} 分别为锈蚀前钢筋的屈服强度、极限强度; β_y 、 β_u 分别为钢筋屈服强度、极限强度的折减系数。

采用基于欧洲规范 CEB-FIP 修正后的黏结滑移恢复力模型^[15], 见式(5)~(7):

$$S_y = \left[\frac{df_y^2 (1 - 7.365\eta_s)^{0.4}}{10E_s \Phi_u \sqrt{f_c}} \right]^{0.714} \quad (5)$$

$$\Phi_u = 1 - \eta_s (10.544 - 1.568 \frac{c}{d}) \quad (6)$$

$$\eta_s = \frac{A_s - A_{sc}}{A_s} \quad (7)$$

式中, S_y 为考虑钢筋锈蚀时的屈服滑移量; d 为钢筋直径; f_y 为钢筋屈服强度; c 为保护层混凝土厚度; η_s 为钢筋锈蚀率; f_c 为混凝土强度; Φ_u 为黏结滑

移退化系数; A_s 、 A_{sc} 分别为锈蚀前后钢筋的截面面积。

1.2 近海高速铁路桥梁材料力学性能变化分析

本文以我国某东南沿海四跨高速铁路刚构桥为例, 该桥处于近海大气环境, III-A 作用等级(图1)。算例桥梁位于地震基本烈度8度设防区域, 场地类型为II类, 地震分组为第一组, 设计使用年限为100年。计算跨径为42 m + 64 m + 64 m + 42 m, 刚构墩墩顶与主梁固结, 1[#]、5[#] 支座墩墩高相同, 桥墩采用C45混凝土, 纵筋和箍筋分别采用 $\Phi 29$ 和 $\Phi 13$, 1[#]、5[#] 墩顶支座采用TJQZ7000-ZX-100-0.3 g球型钢支座, 球面滑板直径为640 mm; 2[#]、3[#]和4[#] 刚构双肢薄壁墩采用C50混凝土, 纵筋及箍筋分别采用 $\Phi 32$ 和 $\Phi 19$ 。

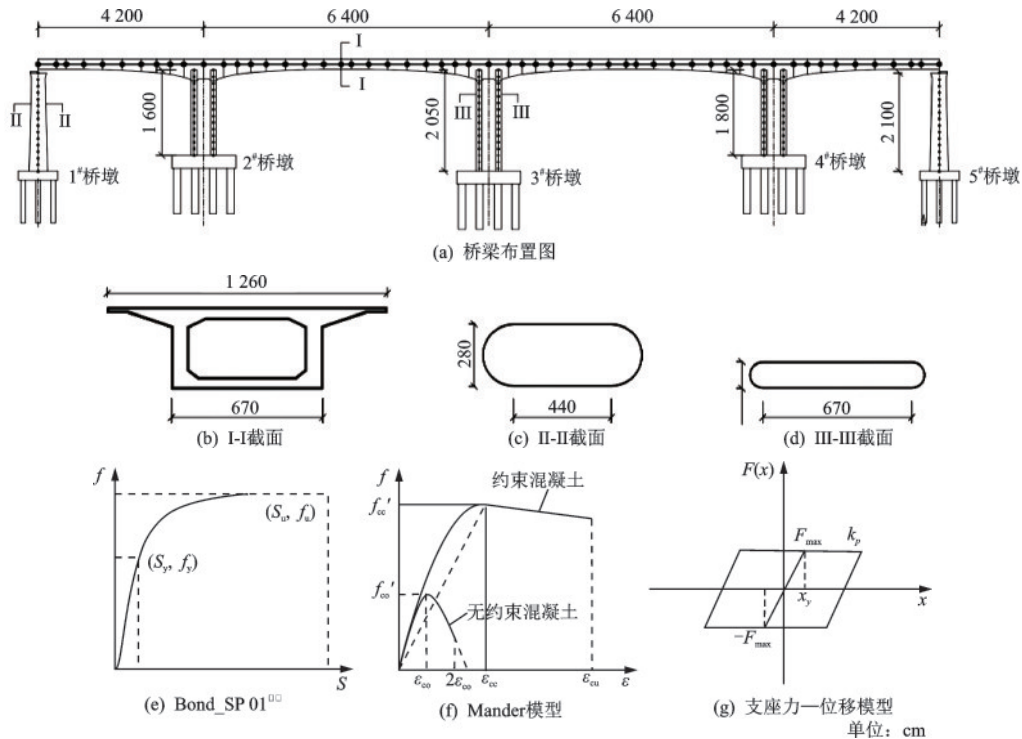


图1 桥梁结构概况

Fig.1 General situation of bridge structure

由式(1)可得钢筋直径随服役时间的变化, 带入式(2)~(4)计算钢筋强度随服役时间的变化规律, 如图2所示。

由图2可知, 钢筋的名义屈服强度和极限强度随服役时间的延长而减小, 服役100年时, 支座墩纵筋的名义屈服强度、极限强度分别降低了9.7%、12.9%, 箍筋分别降低了23.2%、30.8%; 刚构墩纵筋的名义屈服强度、极限强度分别降低了5.9%、

7.9%, 箍筋分别降低了12.6%、16.7%。由于箍筋保护层厚度较纵筋小, 其锈蚀率大于纵筋; 支座墩的混凝土强度较低, 其内部纵筋、箍筋锈蚀程度大于刚构墩。

锈蚀钢筋极限滑移量 S_u 取为屈服滑移量的35倍^[15], 由式(5)~(7)可得服役年限内桥墩的黏结滑移时变参数(图3)。

由图3可知达到设计服役年限时, 支座墩屈服

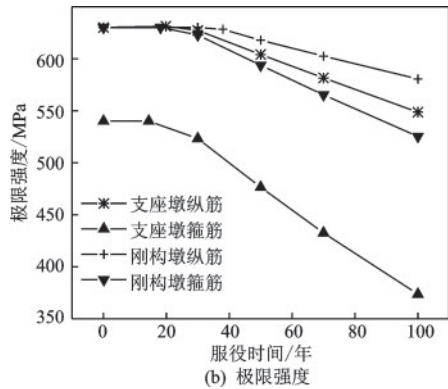
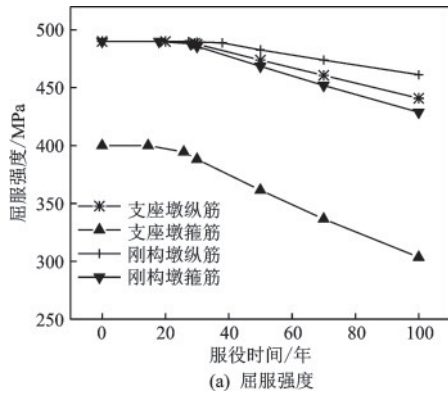


图2 钢筋力学性能变化曲线

Fig.2 Change curve of mechanical properties of rebar

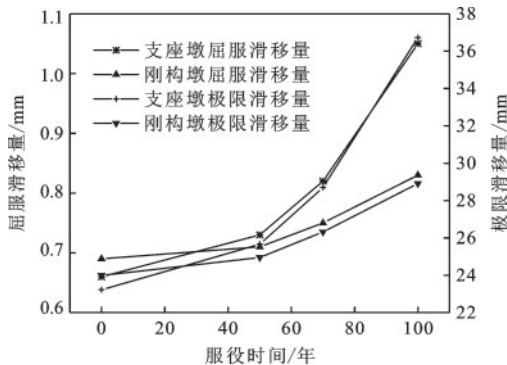


图3 黏结滑移时变参数

Fig.3 Time-varying parameters of bond-slip

滑移量与新建桥墩相比增加 45.5%，刚构墩增加 20.3%。

2 地震动输入与损伤指标的确定

2.1 地震动输入

本文根据桥梁场地条件生成目标反应谱,选取地面峰值加速度(PGA)作为地震动参数^[16],在 PEER 数据库中选取 10 条符合场地条件的地震动记录作为地震需求分析的原始地震波(表 1),采

用 IDA 方法对每条地震动记录在 0.01~1.0g 进行调幅,形成 10 组共 150 条地震波对桥梁结构进行非线性时程分析。由于桥墩顺桥向刚度较小,地震作用下墩顶位移较大,故地震波沿顺桥向输入。

表 1 地震波详情

Table 1 Seismic wave details

序号	地震事件	测点名称	震级	PGA/g
1	Cape Mendocino	Shelter Cove Airport	7.01	0.23
2	Imperial Valley-06	Aeropuerto Mexicali	6.53	0.31
3	Kern County	Taft Lincoln School	7.36	0.16
4	Landers	Joshua Tree	7.28	0.27
5	Tabas_Iran	Dayhook	7.35	0.32
6	Taiwan SMART1(45)	SMART1 O06	7.3	0.17
7	Trinidad	Rio Dell Overpass	7.2	0.15
8	San Fernando	Lake Hughes #12	6.61	0.38
9	Friuli_Italy-01	Tolmezzo	6.5	0.28
10	Irpinia_Italy-01	Brienza	6.9	0.22

2.2 损伤指标的确定

基于 HAZUS-MH-MR 将桥梁损伤状态划分为四个等级:轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏。高铁桥梁地震易损性分析常用的桥墩损伤指标主要有位移延性比^[3,15]和墩顶漂移比^[17]等。对于我国高烈度区高铁桥墩,纵筋配筋率在 0.5%~1%,设计时一般采用延性抗震设计,允许桥墩在地震作用下产生一定的变形。目前位移延性比作为损伤指标应用比较广泛,本文桥墩损伤指标采用位移延性比,计算方法见文献[3]。考虑耐久性损伤后,位移延性比会随服役时间变化(表 2)。支座的损伤指标采用位移表示,由于支座在使用过程中可更换(设计寿命 50 年),故不考虑支座的耐久性损伤,取设计位移(100 mm)、1.5 倍设计位移(150 mm)、2 倍设计位移(200 mm)及 0.5 倍球面滑板直径(320 mm)分别作为支座轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏状态的损伤指标值^[18]。考虑桥墩损伤对支座位移产生影响,分析支座的时变地震易损性。

表2 桥墩时变损伤指标

Table 2 Time-varying damage index of piers

损伤指标	1 [#] 墩				3 [#] 墩			
	0年	50年	70年	100年	0年	50年	70年	100年
μ_{cy1}	1	1	1	1	1	1	1	1
μ_{cy}	1.167	1.167	1.167	1.167	1.271	1.257	1.245	1.226
μ_{c4}	2.972	3.110	3.188	3.302	2.963	3.005	2.986	3.012
μ_{cmax}	5.972	6.110	6.118	6.302	5.963	6.005	5.986	6.012

3 近海高速铁路桥梁时变地震易损性

3.1 有限元模型建立

基于OpenSEES平台,桥墩采用基于柔度法的纤维单元模拟其地震作用下的非线性性能,保护层混凝土采用Concrete 01模型,核心区混凝土考虑箍筋约束作用,采用Mander模型,桥墩底部简化为固结;钢筋采用OpenSEES材料库中的Steel 02模型,钢筋与混凝土黏结滑移效应采用OpenSEES材料库中的Bond_SP 01模型;各本构关系如图1所示。主梁采用弹性梁柱单元;采用非线性连接单元模拟球形支座的非线性性能^[19]。

有限元模型的准确可靠是桥梁抗震分析的基础,基于midas Civil建立该桥模型,并分别进行特征值分析,求解结构前十阶的频率(图4),二者计算结果较为接近。

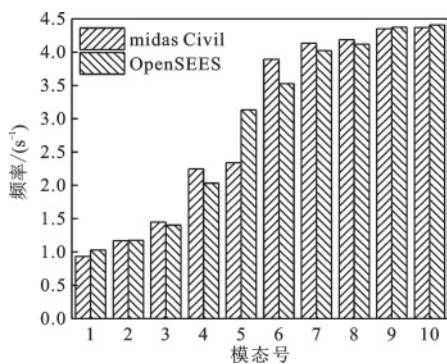


图4 频率对比

Fig.4 Frequency contrast diagram

3.2 易损性函数的确定

地震易损性是在指定地震动强度下,结构或构件的地震响应超过指定状态的条件失效超越概率^[2]:

$$P_f = P(R \geq LS | IM = x) \quad (8)$$

式中, P_f 为结构或构件的超越概率; R 为结构或构件的地震响应; LS 为特定的损伤状态; IM 为地震动强度参数(PGA); x 为地震动强度水平。

采用二阶界限估计法对桥梁系统进行地震易损性分析,具体计算方法参见文献[20],失效概率区间由式(9)确定:

$$P_f + \sum_{i=2}^n \max(P_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} P_{fij}, 0) \leq P_f \leq \sum_{i=1}^n P_{fi} - \sum_{i=2}^n \max_{j < i} (P_{fij}) \quad (9)$$

式中, P_{fi} 为构件失效概率; P_{fi} 为第*i*个构件的失效概率($i \neq 1$); P_{fij} 为第*i*个构件和第*j*个构件同时失效的概率。

为建立高速铁路桥梁各构件易损性函数,将位移延性比、位移进行对数线性拟合回归分析,并代入式(8)计算,桥墩和支座的易损性函数见表3。

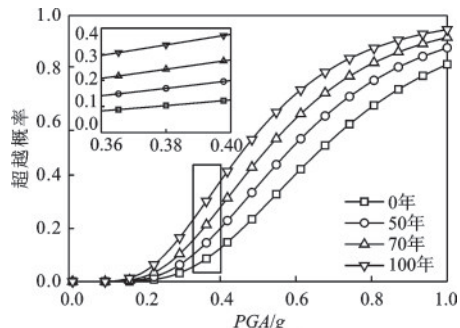
表3 构件易损性函数

Table 3 Component fragility function

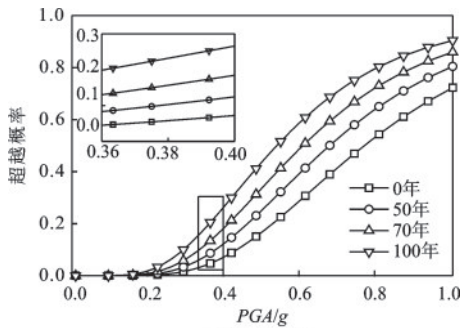
编号	易损性函数
1 [#] 桥墩	$P_f = \phi \left[\frac{\ln(1.5677(PGA)^{1.1184})}{0.5} \right]$
3 [#] 桥墩	$P_f = \phi \left[\frac{\ln(2.5185(PGA)^{1.0702})}{0.5} \right]$
1 [#] 支座	$P_f = \phi \left[\frac{\ln(0.0992(PGA)^{0.7025})}{0.5} \right]$

3.3 高铁桥梁构件时变地震易损性分析

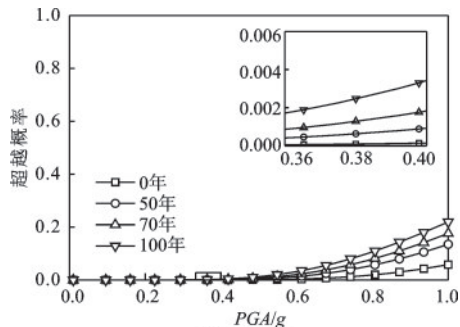
基于桥墩、支座易损性函数,考虑材料耐久性损伤后,建立各构件时变地震易损性曲线。2[#]、3[#]和4[#]刚构墩墩高不同,地震易损性随墩高的增加而减小,整体变化趋势与3[#]桥墩相近。本文以支座墩1[#]、刚构墩3[#]及1[#]墩墩顶支座为例,如图5~7所示。由图5~6可知,不同损伤状态下桥墩的超越概率



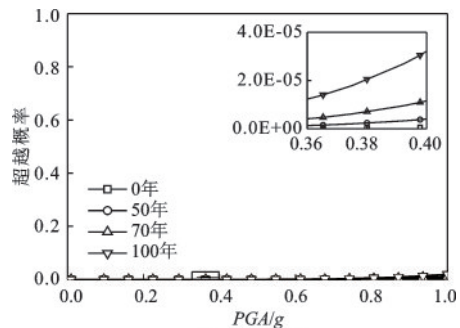
(a) 轻微损伤



(b) 中等损伤



(c) 严重损伤

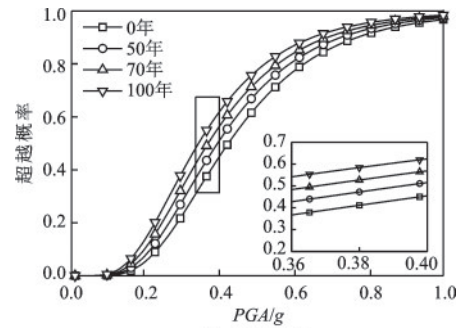


(d) 完全破坏

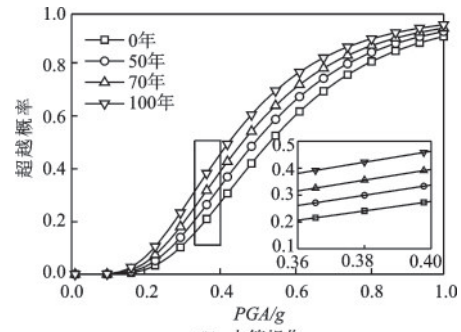
图5 1[#]墩时变易损性曲线

Fig.5 Time-varying fragility curve of pier 1[#]

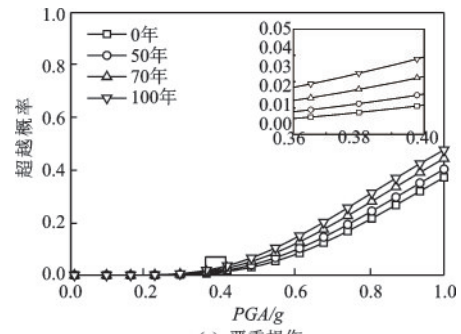
随服役年限的延长而增加。PGA 相同时,1[#]墩的超越概率随服役时间增长的速度大于3[#]墩,主要原因是随时间的延长1[#]墩材料性能劣化和黏结滑移退化速度较快。以中等损伤状态为例,8度设计地震($PGA=0.2g$)作用下,达到设计服役年限时,1[#]、3[#]墩的超越概率分别为1.7%、6.6%,与新建时相比分别增长了1.6%、4.8%。8度罕遇地震($PGA=$



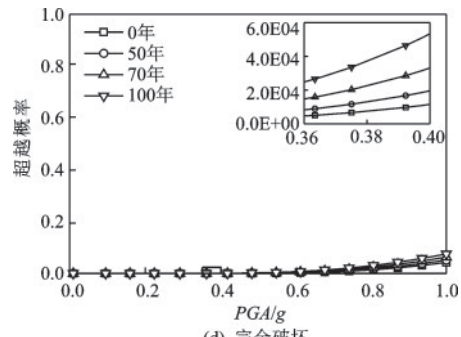
(a) 轻微损伤



(b) 中等损伤



(c) 严重损伤



(d) 完全破坏

图6 3[#]墩时变易损性曲线

Fig.6 Time-varying fragility curve of pier 3[#]

0.38g)作用下,1[#]墩达到设计服役年限时,轻微损伤和中等损伤状态下超越概率与新建桥墩相比分别增加了22.8%、16.9%;由于高铁桥梁在设计时有较多的安全储备,避免其地震作用下发生倒塌,故在选取的损伤指标下,严重损伤和完全破坏时桥梁的超越概率仅增加0.2%和0.01%。当桥梁达到设计服役年限, $PGA=1.0g$ 时,1[#]、3[#]墩完全破坏的概率分别为1.9%、7.5%。服役期内桥墩易发

生轻微损伤和中等损伤,发生严重损伤和完全破坏的概率较低。

由图7可知,随着桥梁服役年限延长,各损伤状态下支座易损性逐渐增大。轻微损伤状态下支座易损性随PGA变化较大。达到设计服役年限时,8度设计地震作用下上述四种状态下的超越概率分别为25.1%、0.3%、0.05%、0.005%;8度罕遇地震作

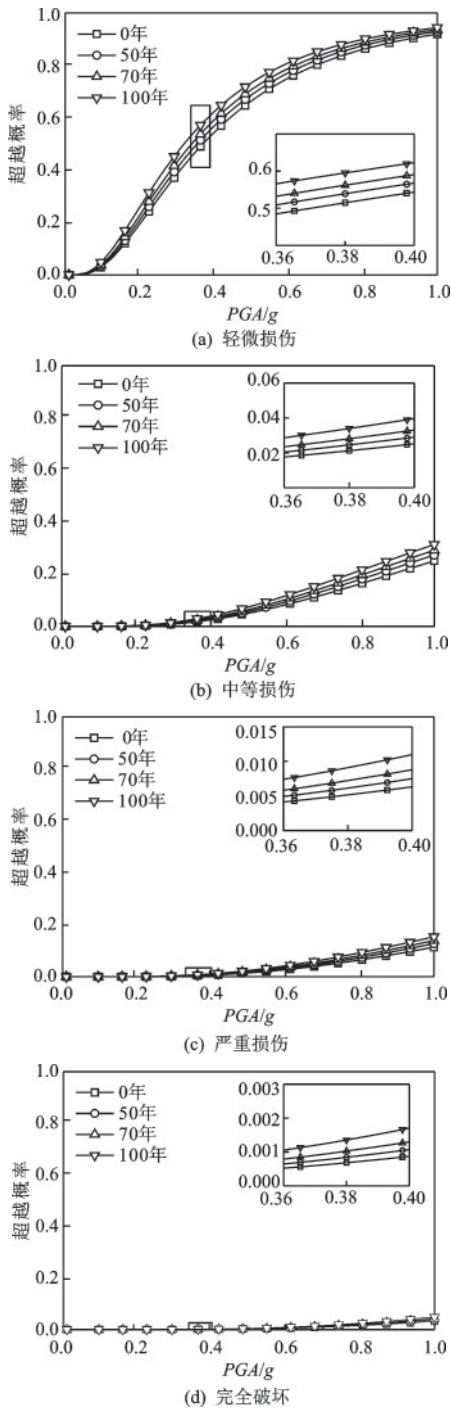


图7 1#支座时变易损性曲线
Fig.7 Time-varying fragility curve of support 1#

用下,四种损伤状态下超越概率较新建时分别增加8.1%、1.2%、0.4%、0.1%。

3.4 高铁桥梁系统时变易损性分析

结合桥梁各构件的时变地震易损性曲线,基于二阶界限估计法桥梁系统失效概率计算公式(9),

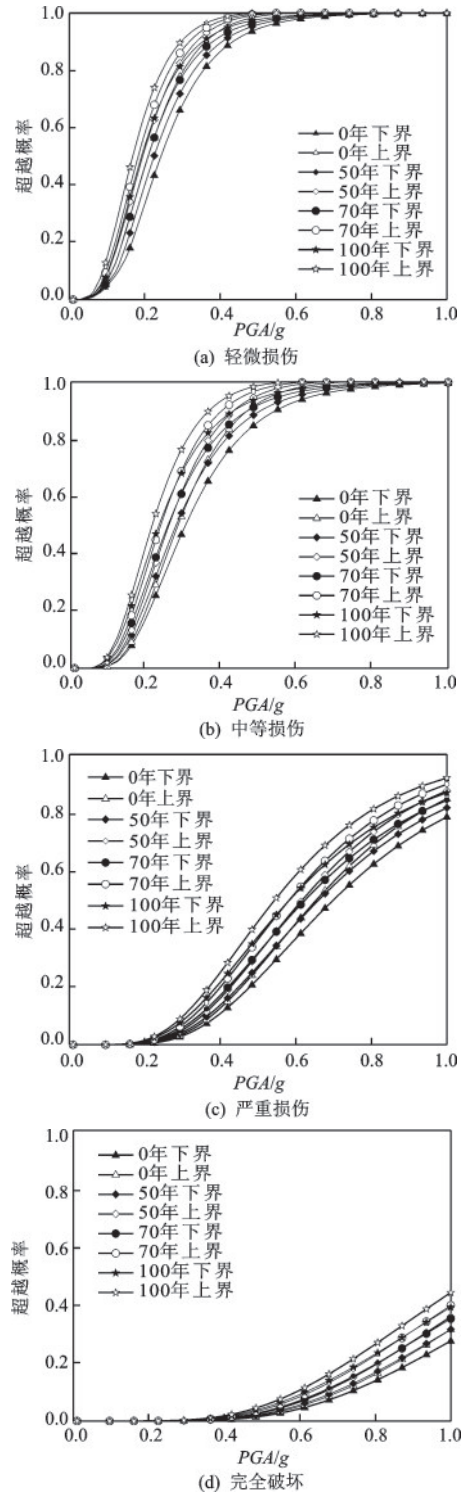


图8 桥梁系统时变易损性曲线
Fig.8 Time-varying fragility curve of system

各损伤状态下高速铁路桥梁系统时变易损性曲线如图8所示。

高速铁路桥梁系统易损性曲线的上界和下界随着桥梁服役年限的延长呈上升趋势,带宽随PGA的变化趋势相同。服役100年时,桥梁系统在8度罕遇地震作用下发生轻微损伤、中等损伤、严重损伤及完全破坏的超越概率分别为97.5%、91.6%、21.5%、1.4%,与新建桥梁相比,分别增大了5.3%、15.1%、11.1%、1%。达到设计服役年限时,桥梁系统在8度设计地震作用下,发生轻微损伤、中等损伤、严重损伤和完全破坏超越概率上界分别为63.6%、42.1%、1.4%、0.2%;8度罕遇地震作用下,四种损伤状态超越概率上界分别为97.3%、91.1%、20.7%、1.3%,桥梁系统容易发生轻微损伤和中等损伤,发生完全破坏的概率较小。由于考虑构件失效模式的相关性,桥梁系统的易损性大于各构件的易损性,以中等损伤状态为例,桥梁达到设计服役年限时,在8度罕遇地震作用下,1[#]墩、3[#]墩和支座的超越概率分别为22.4%、41.2%、3.3%,桥梁系统的超越概率为91.1%。

4 结 论

(1)考虑高速铁路桥梁服役期内材料耐久性损伤后,钢筋锈蚀对其力学性能影响较大,根据黏结滑移退化分析,桥梁达到设计服役年限时,支座墩屈服滑移量与新建桥墩相比增加45.5%,刚构墩增加20.3%,支座墩混凝土等级较刚构墩低,其钢筋锈蚀更为严重,屈服滑移量变化较大。

(2)由于耐久性损伤对桥梁抗震性能产生影响,随着服役期的延长,不同损伤状态下各桥墩和支座的超越概率明显增大,1[#]墩达到设计服役年限时,在8度罕遇地震作用下,四种损伤状态下超越概率与新建时相比分别增加了22.8%、16.9%、0.2%、0.01%;支座对应的超越概率分别增加了8.1%、1.2%、0.4%、0.1%。

(3)近海环境下,高速铁路桥梁随服役期的延长,其系统易损性逐渐增大。8度设计地震作用下,桥梁服役期内轻微损伤时超越概率上界值最大为63.6%,中等损伤状态时上界值最大为42.1%,严重损伤状态时上界值最大为1.4%,完全破坏状态时上界值最大仅为0.2%。8度罕遇地震作用下,达到设计服役年限时,桥梁系统发生轻微损伤及中等损伤

的概率较大、严重损伤概率较小,发生完全破坏的概率约为1%。

本文进行高铁桥梁地震易损性研究时未考虑轨道系统对桥梁地震易损性的影响,轨道系统作为高铁桥梁的重要组成部分,其对桥梁地震易损性的影响需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 谢毅,肖杰.高速铁路发展现状及趋势研究[J].高速铁路技术,2021,12(2):23-26.
Xie Y, Xiao J. Research on high-speed railway development status and trend[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 23-26. (in Chinese)
- [2] 吴文朋,李立峰,胡思聪,等.公路桥梁地震易损性分析的研究综述与展望[J].地震工程与工程振动,2017,37(4):85-96.
Wu W P, Li L F, Hu S C, et al. Research review and future prospect of the seismic fragility analysis for the highway bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 37(4): 85-96. (in Chinese)
- [3] 成虎,李宏男,王东升,等.考虑锈蚀黏结退化的钢筋混凝土桥墩抗震性能分析[J].工程力学,2017,34(12):48-58.
Cheng H, Li H N, Wang D S, et al. Seismic performance analysis of reinforced concrete piers considering corrosion and bond degradation[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 48-58. (in Chinese)
- [4] 户东阳.渝昆高铁典型连续梁桥地震易损性分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):297-305.
Hu D Y. Seismic fragility analysis of typical continuous girder bridges of Chongqing-Kunming high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 297-305. (in Chinese)
- [5] 魏标,杨添涵,蒋丽忠.轨道结构建模精细化程度对高速铁路连续梁桥地震易损性的影响[J].工程力学,2018,35(4):16-23,51.
Wei B, Yang T H, Jiang L Z. The effects of model refinement of ballastless tracks, on the seismic vulnerability of a continuous bridge on a high-speed railway[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 16-23, 51. (in Chinese)
- [6] Cui F K, Zhang H N, Ghosn M, et al. Seismic fragility analysis of deteriorating RC bridge substructures subject to marine chloride-induced corrosion[J]. Engineering Structures, 2018, 155: 61-72.
- [7] Ghosh J, Padgett J E. Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility

- curves[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(12): 1497-1511.
- [8] Blomfors M, Zandi K, Lundgren K, et al. Engineering bond model for corroded reinforcement[J]. Engineering Structures, 2018, 156: 394-410.
- [9] 傅沛瑶,徐略勤,龚恋,等.材料性能劣化对刚构桥地震易损性的影响分析[J].防灾减灾工程学报, 2020, 40(5):779-788,810.
Fu P Y, Xu L Q, Gong L, et al. Effect of material deterioration on the seismic fragility of rigid frame bridges[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5):779-788,810.(in Chinese)
- [10] Liang Y, Yan J L, Qian W X, et al. Analysis of collapse resistance of offshore rigid frame-continuous girder bridge based on time-varying fragility[J]. Marine Structures, 2021, 75: 102844.
- [11] Liang Y, Yan J L, Cheng Z Q, et al. Time-varying seismic fragility analysis of offshore bridges with continuous rigid-frame girder under main aftershock sequences[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(8): 04020055.
- [12] Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(3): 135-147.
- [13] 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.
- [14] Cairns J, Plizzari G A, Du Y G, et al. Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement[J]. ACI Materials Journal, 2005, 102(4): 256-264.
- [15] 成虎. 氯离子侵蚀钢筋混凝土桥墩地震易损性研究[D].大连:大连理工大学, 2019.
- Cheng H. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridge piers under chloride-included corrosion[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] Wei B, Li C B, He X H. The applicability of different earthquake intensity measures to the seismic fragility of a high-speed railway continuous bridge[J]. International Journal of Civil Engineering, 2019, 17(7): 981-997.
- [17] 胡章亮,魏标,蒋丽忠,等.高速铁路桥墩损伤量化研究[J/OL]. 土木工程学报: 1-10[2022-04-25]. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21121285.
Hu Z L, Wei B, Jiang L Z, et al. Research on quantification of damage of high-speed railway bridge piers[J/OL]. China Civil Engineering Journal: 1-10[2022-04-25]. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21121285.(in Chinese)
- [18] 宋帅,钱永久,吴刚.基于多元Copula函数的桥梁体系地震易损性分析方法研究[J].振动与冲击, 2017, 36(9): 122-129,208.
Song S, Qian Y J, Wu G. seismic fragility analysis of a bridge system based on multivariate copula function[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(9): 122-129,208. (in Chinese)
- [19] 班亚云.考虑近海耐久性损伤的混凝土梁桥时变地震易损性分析[D].郑州: 郑州大学, 2018.
Ban Y Y. Analysis of time-varying seismic fragility of concrete bridges with durability damage in coastal waters.[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
- [20] Ditlevsen O. Narrow reliability bounds for structural systems[J]. Mechanics based Design of Structures and Machines, 1979, 7(4): 453-472.

(本文责编:池营营)