

文章编号:1671-6833(2023)01-0096-07

# 多跨连续梁-刚构桥地震易损性分析

梁岩,张卓航,班亚云,王艳

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

**摘要:**为研究多跨连续梁-刚构桥地震易损性,基于 OpenSEES 平台,建立实际桥梁非线性地震反应分析模型。通过增量动力分析,建立不同桥墩、支座及桥台等桥梁构件易损性曲线,分析了全寿命周期内桥梁关键抗震构件桥墩的时变地震易损性,采用界限法估算桥梁结构系统的失效概率,研究算例桥梁的系统易损性。结果表明:在同一损伤状态下,1#与4#桥墩较易出现损伤,5#桥墩其次,2#和3#桥墩的概率最小,即墩高、材料强度及墩顶约束均会影响其易损性;桥台处支座相比于桥墩处支座,更易产生损伤;两桥台易损性曲线斜率较大,其发生同一损伤的概率无明显差别;全寿命周期内耐久性损伤后桥墩轻微损伤、中等损伤及严重破坏的超越概率显著增大,中等损伤状态下的超越概率分别增大3.1%、11.3%、20.9%、29.1%、34.1%,严重损伤状态下分别增大3.9%、13.5%、25.1%、33.4%、35.4%。桥梁系统易损性大于各构件,采用单个构件易损性来评估桥梁易损性会高估桥梁抗震性能。

**关键词:**桥梁工程;抗震性能;易损性;桥墩;耐久性

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2022.04.003

公路桥梁是交通工程的重要组成部分,近年来国内外桥梁抗震性能评价、加固改造实践和震害经验表明,对公路桥梁进行抗震性能评价,并对不满足评价要求的桥梁采取适当的抗震加固改造对策,是减轻地震灾害的重要途径<sup>[1]</sup>。桥梁地震易损性分析是桥梁抗震性能评价的重要依据<sup>[2]</sup>,可预测在地震作用下,结构达到或超越某一损伤指标的概率。易损性分析方法在考虑地震动随机性及结构损伤不确定性的同时,能够有效地将桥梁在地震中的失效概率和桥梁的承载能力建立起某种概率上的联系。户东阳<sup>[3]</sup>基于往年收集的渝昆高铁沿线实测地震动记录资料,研究了不同形式支座的抗震性能,以及桥墩的地震易损性。王君<sup>[4]</sup>、陈伟等<sup>[5]</sup>均以国内典型的高速铁路桥梁为工程背景,采用地震时程分析方法(IDA)对桥梁的地震易损性进行分析。Basoez等<sup>[6]</sup>同样根据收集的震害资料,依据逻辑回归法,分析地震作用下桥梁构件的易损性。

随着国内高烈度区公路桥梁的建造,多跨连

续梁-刚构桥逐渐增多,研究该桥型地震易损性对其抗震性能评估有重要意义。而国内外对桥梁地震易损性的研究多集中于桥墩,对于耐久性损伤下桥墩抗震性能的研究仅针对带支座的桥墩,未考虑墩顶约束作用,未重视服役期内材料性能的退化,且忽略了桥梁系统的损伤概率与单一构件的损伤概率之间的差异性,仅以构件的损伤概率分析地震作用下桥梁整体的损伤,导致结构存在安全隐患。

本文基于地震易损性分析理论对某多跨连续梁-刚构桥梁构件(桥墩、支座、桥台)进行易损性研究,分析桥梁构件在地震作用下的失效概率,并采用界限法评估整个桥梁系统的抗震性能。

## 1 非线性有限元模型建立

OpenSEES 可对结构进行模态分析、动力非线性分析以及结构体系在地震作用下的可靠性分析<sup>[7]</sup>。基于 OpenSEES 建立某连续梁-刚构桥非线性有限元模型。该桥长6×60 m,桥型如图1所示。

**收稿日期:**2022-08-05;**修订日期:**2022-10-20

**基金项目:**河南省重点研发与推广专项(212102310268);国家自然科学基金资助项目(51608488)

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

**通信作者:**王艳(1980—),女,河南清丰人,郑州大学副教授,博士,主要从事桥梁结构计算理论及其应用研究,E-mail:554787837@qq.com。

**引用本文:**梁岩,张卓航,班亚云,等.多跨连续梁-刚构桥地震易损性分析[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(1):96-102.(LIANG Y, ZHANG Z H, BAN Y Y, et al. Seismic fragility analysis of multi-span continuous girder-rigid frame bridges[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2023, 44(1): 96-102.)

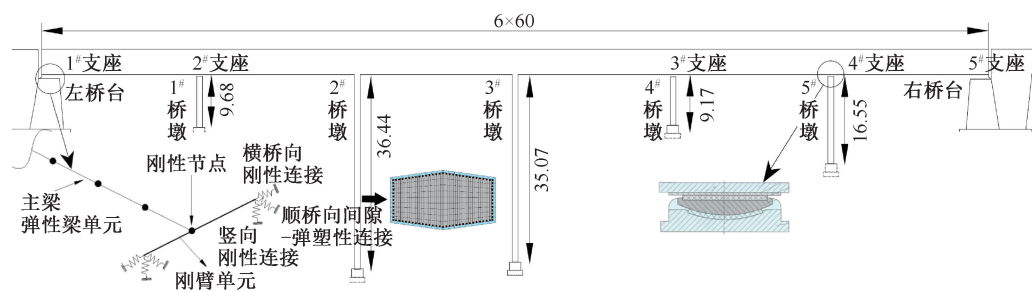


图 1 算例桥梁计算简图 (m)

Figure 1 Diagram of the example bridge (m)

主梁等高 (3.35 m), 采用 C50 混凝土。桥面宽度为 12.2 m。桥墩 1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 及 5<sup>#</sup> 为分离式菱形实体墩, 采用 C40 混凝土; 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 墩采用 C50 混凝土, 为墩梁固接桥墩。纵筋为 32 mm 带肋钢筋, 屈服强度 335 MPa; 箍筋为 16 mm 光圆钢筋, 屈服强度 235 MPa。该桥实际工程所处位置墩底主要为弱风化岩, II 类场地。所处区域 7 度抗震设防, 地震分组为第一组。各构件在不同损伤状态下用以评估的损伤指标  $S_e$  和不确定性  $\beta_e$  见表 1。

表 1 桥梁不同构件的损伤指标及不确定性

Table 1 Damage index and uncertainty of different bridge components

构件指标	轻微损伤		中等损伤		严重损伤		完全破坏	
	$S_e$	$\beta_e$	$S_e$	$\beta_e$	$S_e$	$\beta_e$	$S_e$	$\beta_e$
1 <sup>#</sup> 桥墩 $\mu$	1.000	0.246	1.199	0.246	1.482	0.472	4.482	0.472
2 <sup>#</sup> 桥墩 $\mu$	1.000	0.246	1.203	0.246	1.276	0.472	4.276	0.472
3 <sup>#</sup> 桥墩 $\mu$	1.000	0.246	1.203	0.246	1.259	0.472	4.259	0.472
4 <sup>#</sup> 桥墩 $\mu$	1.000	0.246	1.198	0.246	1.485	0.472	4.485	0.472
5 <sup>#</sup> 桥墩 $\mu$	1.000	0.246	1.200	0.246	1.456	0.472	4.456	0.472
支座 $\Delta$	0.037	0.246	0.104	0.246	0.136	0.472	0.187	0.472
桥台 $\Delta$	0.025	0.246	0.050	0.246	0.100	0.472	0.150	0.472

采用 OpenSEES 材料库中的 Concrete 01 本构和 Steel 02 本构分别对混凝土材料和钢筋材料进行模拟。桥墩非线性特征采用 Nonlinear Beam Column 模拟, 桥梁上部结构采用 Elastic Beam Column 模拟, 桥台球型支座采用非线性连接单元模拟及 Zero-Length Element 模拟。依据本课题组前期所做钢筋混凝土柱试验<sup>[8]</sup>建立模型, 采用相同加载方式加载, 对比模型模拟结果与实际试验结果如图 2 所示。试验结果与计算结果较为吻合, 验证了建模方法及建模参数的可靠性。

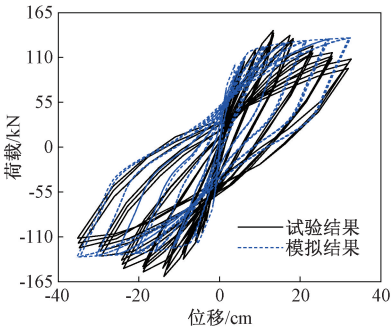


图 2 滞回曲线对比

Figure 2 Hysteretic curve comparison

根据算例桥梁所处区域的地质条件, 基于抗震设计规范<sup>[9]</sup>生成目标反应谱。依照所生成的反应谱, 从 PEER 强震库中合理选取地震强度等级均为 7 级的地震动记录, 用作非线性动力分析的原始地震动。所生成的目标反应谱以及整合后的均值反应谱如图 3 所示。

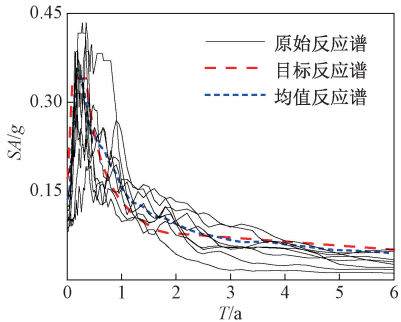


图 3 地震动反应谱 ( $\xi=0.05$ )

Figure 3 Seismic response spectrum ( $\xi=0.05$ )

地震反应谱加速度  $S_A$  对地震动拟合效果较好<sup>[10]</sup>。选取  $S_A$  作为地震动强度指标, 以桥梁第一阶周期 1.012 s 所对应的实测  $S_A$  为基准调整, 使其均匀分布于 0.1g~1.0g, 形成 10 组共 150 条不同等级的地震数据, 对有限元模型进行非线性动力时程

分析。IDA 分析中地震动的调幅公式:

$$a_g^{(i)}(t) = k_i a(t)。$$

(1)

式中:  $a_g^{(i)}(t)$  为第  $i$  次调幅后地震动;  $a(t)$  为原始地震动;  $k_i$  为调幅系数。

2 关键构件易损性分析

分析桥梁各构件在模拟地震动下的易损性,得到在不同强度等级的地震作用下桥台、支座、桥墩达到各损伤指标状态的超越概率。

根据易损性分析理论,对模型输入所选取的 150 条地震动并进行非线性动力分析,采用 IDA 分析方法,调幅地震动,得出计算样本数据点,用对数线性回归分析方法整合数据点,得出各构件在地震作用下需求响应值与反应谱  $SA$  的对数拟合函数。结合表 1 给出各构件的损伤指标参数,根据式(2)计算构件失效概率<sup>[11]</sup>:

$$P_f = \Phi\left(\frac{a + b \ln IM - \ln S_c}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}}\right)。$$

(2)

式中:  $P_f$  为失效概率;  $IM$  为地震动强度参数;  $\beta_d$  为结构在地震作用下最大反应的对数标准差,参见式(3)取值<sup>[12]</sup>:

$$\beta_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln S_{di} - (\ln a + b \ln IM_i)]^2}{n - 2}}。$$

(3)

分别计算各构件(桥墩、支座、桥台)在不同强度地震作用下,所产生轻微损伤、中等损伤、严重损伤以及完全破坏下的超越概率并绘制曲线,对比分析其易损性曲线,评估桥梁各构件的抗震性能。

2.1 桥墩易损性分析

取各桥墩的 150 个不同强度地震(0.1g~1.0g)作用下的响应值和对应的地震动反应谱加速度  $SA$ ,采用对数线性回归方法,得到各桥墩的地震响应值与  $SA$  的对数回归分析结果,将结果代入式(2),从而得到各桥墩的易损性函数式。

为计算桥墩的地震易损性损伤指标,通过弯矩-曲率分析,计算桥墩钢筋屈服时曲率值并计算其等效屈服曲率  $\phi'_y$  及混凝土应变  $\varepsilon_c = 0.004$  时的曲率  $\phi_{c4}$ ,将曲率值代入并得到桥墩不同损伤状态时的损伤指标界限值  $\mu_{cy1} \mu_{cy} \mu_{c4} \mu_{cmax}$ :

$$\mu_{cy1} = \frac{\Delta_{cy1}}{\Delta_{cy1}} = 1;$$

(4)

$$\mu_{cy} = \frac{\Delta_{cy}}{\Delta_{cy1}} = \frac{\frac{1}{3}\phi_y L^2}{\frac{1}{3}\phi'_y L^2} = \frac{\phi_y}{\phi'_y};$$

(5)

$$\Delta_{c4} = \Delta_{cy} + \Delta_{p4} = \frac{1}{3}\phi_y L^2 + \theta_{p4}\left(L - \frac{1}{2}L_p\right);$$

(6)

$$\mu_{c4} = \frac{\Delta_{c4}}{\Delta_{cy1}};$$

(7)

$$\mu_{cmax} = \mu_{c4} + 3。$$

(8)

式中:  $\Delta_{cy}$  为桥墩屈服时墩顶相对位移;  $\Delta_{c4}$  为混凝土截面最外侧应变  $\varepsilon_c$  达到 0.004 时墩顶相对位移;  $L_p$  为等效塑性铰长度;  $L$  为悬臂桥墩墩高。

所得桥墩损伤状态指标如表 2 所示。1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>桥墩易损性曲线如图 4 所示。

表 2 桥墩损伤状态指标

Table 2 Damage status index of pier

损伤状态	破坏准则
无损伤	$\mu_d < \mu_{cy1}$
轻微损伤	$\mu_{cy1} \leq \mu_d < \mu_{cy}$
中等损伤	$\mu_{cy} \leq \mu_d < \mu_{c4}$
严重损伤	$\mu_{c4} \leq \mu_d < \mu_{cmax}$
完全破坏	$\mu_d \geq \mu_{cmax}$

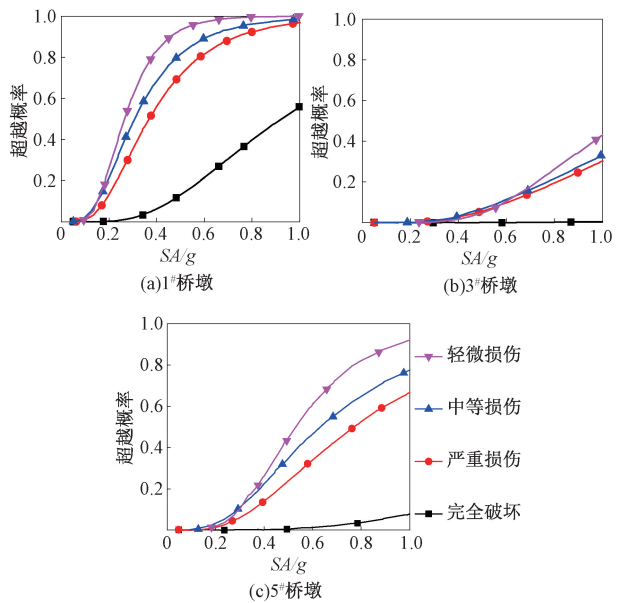


图 4 桥墩地震易损性曲线

Figure 4 Seismic fragility curve of the pier

在不同损伤状态下,各桥墩的超越概率随  $SA$  的增大明显升高;对比各桥墩发生在轻微损伤、中等损伤、严重损伤、完全破坏的易损性曲线,前 3 种较为接近,且随着地震强度增大其超越概率在 0.2~0.7 之间上升较快,0.7 之后趋于平稳;同一地震强度下,桥墩出现完全破坏的概率明显低于其他损伤的概率。

为分析桥墩类型对自身易损性的影响,各桥墩不同损伤状态下的超越概率曲线见图 5。

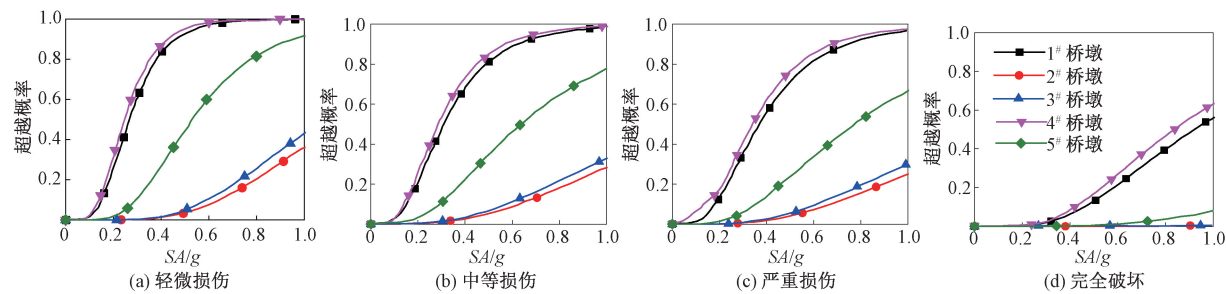


图 5 桥墩在不同损伤状态下的地震易损性曲线

Figure 5 Seismic fragility curves of the pier in different damage states

对于 1<sup>#</sup>与 4<sup>#</sup>桥墩,谱加速度  $SA=0.6g$  时,轻微损伤、中等损伤以及严重损伤状态的超越概率大于 80%,完全破坏概率较小,约为 20%;5<sup>#</sup>桥墩在谱加速度  $SA=0.6g$  发生轻微损伤、中等损伤、严重损伤以及完全破坏的概率分别为 60%、45%、34%、1%;2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>桥墩在谱加速度  $SA=0.6g$  出现轻微损伤、中等损伤、严重损伤概率小于 9%,完全破坏概率较小。

由于桥墩延性变形能力与桥墩高度呈现正相关,且 1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>及 5<sup>#</sup>桥墩混凝土采用 C40,比 2<sup>#</sup>与 3<sup>#</sup>桥墩 C50 强度低,同时由于上部梁体对刚构墩的固结作用,在相同损伤状态下,1<sup>#</sup>与 4<sup>#</sup>桥墩出现损伤概率较大,5<sup>#</sup>桥墩次之,2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>桥墩的概率最小,随着墩高增加,桥梁变形能力增大,其地震易损性逐渐减小。

由于 1<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>墩高度接近且均为支座墩,易损性曲线基本相同;2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>墩高度接近且均为墩梁固结,易损性曲线基本相同。桥墩易损性与材料强度、墩高、墩梁连接方式及墩顶荷载等有关。

2.2 支座、桥台易损性分析

易损性分析方法与桥墩相同。支座位移损伤指标和桥台位移损伤指标如表 3 所示。支座易损性曲线未单独绘制,将与其他构件共同分析。左、右桥台易损性曲线见图 6。

表 3 支座和桥台损伤状态指标

状态	破坏准则	
	支座	桥台
无损伤	$\Delta < 37$	$\Delta < 25$
轻微损伤	$37 \leq \Delta < 104$	$25 \leq \Delta < 50$
中等损伤	$104 \leq \Delta < 136$	$50 \leq \Delta < 100$
严重损伤	$136 \leq \Delta < 187$	$100 \leq \Delta < 150$
完全破坏	$\Delta \geq 187$	$\Delta \geq 150$

桥台不同损伤状态下的易损性曲线斜率较大,在  $SA=0.4g$  时,发生轻微和中等损伤状态的概率均高于 90%,在  $SA=0.6g$  时,严重损伤和完全破坏的

超越概率分别为 69%、30%;左右桥台发生同一损伤的易损性曲线无明显差别。

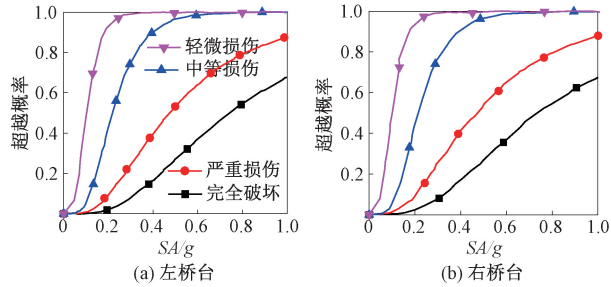


图 6 桥台地震易损性曲线

Figure 6 Seismic fragility curves of the abutment

3 耐久性损伤桥墩时变地震易损性分析

本文基于桥址位置并参考《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS 220—2007)<sup>[13]</sup>,以 5<sup>#</sup>桥墩为例,分析近海环境下其氯离子侵蚀致使钢筋锈蚀的变化规律,得到不同服役期钢筋各项参数值,见表 4。

为研究不同服役期钢筋的锈蚀率对桥墩地震响应的影响,首先计算桥墩在 0、20、40、60、80、100 a 服役期力学性能,基于已建立的 OpenSEES 非线性有限元模型,对比分析不同服役期内易损性曲线如图 7 所示。

结果显示,在同强度地震作用下,5<sup>#</sup>桥墩在 4 种状态的易损性随着服役期增加而逐渐升高。相比于 0 a 钢筋未锈蚀的桥墩构件,20、40、60、80、100 a 服役期的超越概率在中等损伤状态下,分别增大 3.1%、11.3%、20.9%、29.1%、34.1%;严重损伤状态下,分别增大 3.9%、13.5%、25.1%、33.4%、35.4%。

4 桥梁系统易损性分析

桥梁结构理论中串联体系和并联系统的失效概率<sup>[14]</sup>可用以下公式计算:

$$\begin{aligned} P_{\text{sys}} &= P(F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup \dots \cup F_n) \\ &= P_r \left( \bigcup_{i=1}^n F_i \leq 0 \right); \end{aligned} \quad (9)$$



表 4 不同服役期的钢筋特征值

Table 4 Characteristic values of reinforcement in different service periods

服役 年限/a	纵筋				箍筋			
	屈服强度/ MPa	钢筋直径/ mm	弹性模量/ 10 <sup>5</sup> MPa	锈蚀率/%	屈服强度/ MPa	钢筋直径/ mm	弹性模量/ 10 <sup>5</sup> MPa	锈蚀率/%
0	335.00	32.00	2.00	0	235.00	16.00	2.00	0
20	334.86	31.99	1.99	0.2	234.83	15.93	1.99	0.5
40	332.04	31.32	1.90	4.1	232.85	15.11	1.90	10.2
60	322.93	30.43	1.78	9.7	230.72	14.18	1.78	20.6
80	318.15	29.53	1.65	14.8	228.72	13.24	1.65	33.5
100	312.51	28.63	1.54	19.2	226.86	12.21	1.54	41.4

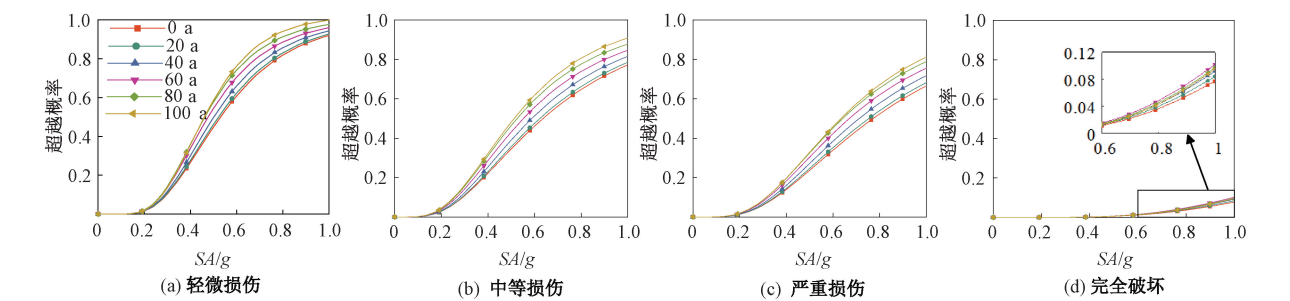


图 7 桥墩时变易损性曲线

Figure 7 Time varying fragility curve of pier

$$P_{\text{sys}} = P(F_1 \cap F_2 \cap F_3 \cap \cdots \cap F_n)$$
$$= P_r \left( \bigcap_{i=1}^n F_i \leq 0 \right) \quad (10)$$

式中: $P_{\text{sys}}$  为整个系统失效的概率; $F_i(i=1,2,\cdots,n)$  表示结构第  $i$  个构件失效。

根据各个构件的易损性函数从而建立整个工程结构系统的易损性函数,即界限估计法。一阶界限法通过假定桥梁构件失效模式的正相关性 ( $\rho=0$  和  $\rho=1$ ),评估桥梁系统的最大与最小失效概率,从而确定系统失效概率的上限值和下限值,可表示为<sup>[15]</sup>

$$\max_{i=1}^m [P_i] \leq P_{\text{sys}} \leq 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i] \quad (11)$$

式中: $P_i$  为第  $i$  个构件发生破坏的概率; $m$  为构件数目。

一阶界限法上限值的计算公式为

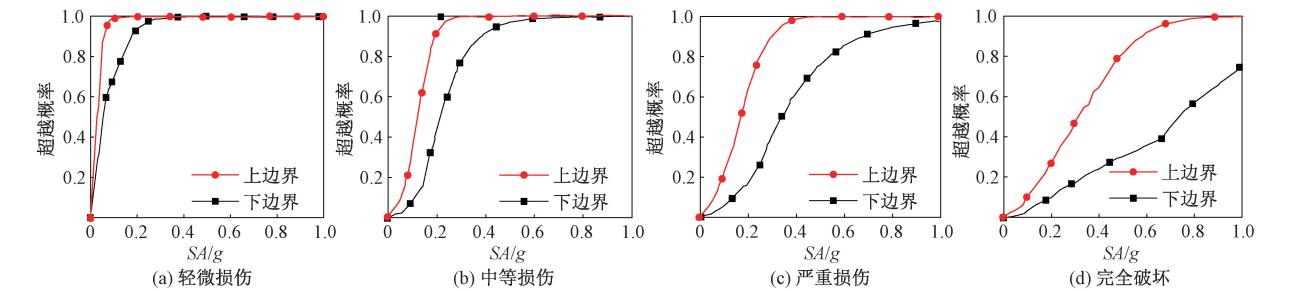


图 8 桥梁系统在不同损伤状态下的地震易损性曲线

Figure 8 Seismic fragility curves of the bridge system in different damage states

$$1 - \prod_{i=1}^{12} [1 - P_i] = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3) \cdots (1 - P_{11})(1 - P_{12}) \quad (12)$$

根据桥墩、支座和桥台的地震易损性分析结果,桥梁系统在各损伤状态下的易损性曲线界限值如图 8 所示,汇总桥梁各构件以及桥梁系统易损性曲线于图 9。

由于桥梁各构件的最大超越概率决定了系统易损性的下限值,相比于单个构件,桥梁系统超越概率更大,SA=0.6g 时发生严重损伤的超越概率已经达到 95%以上。若忽略各主要构件对全桥系统抗震性能的影响,以单个构件的易损性来评估桥梁系统的易损性,会高估桥梁抗震性能。

桥梁不同构件的易损性存在较大差异。对于本文实际工程,2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>支座最易发生轻微破坏,其次是桥台,2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>刚桥墩发生轻微破坏的概率最小;中等

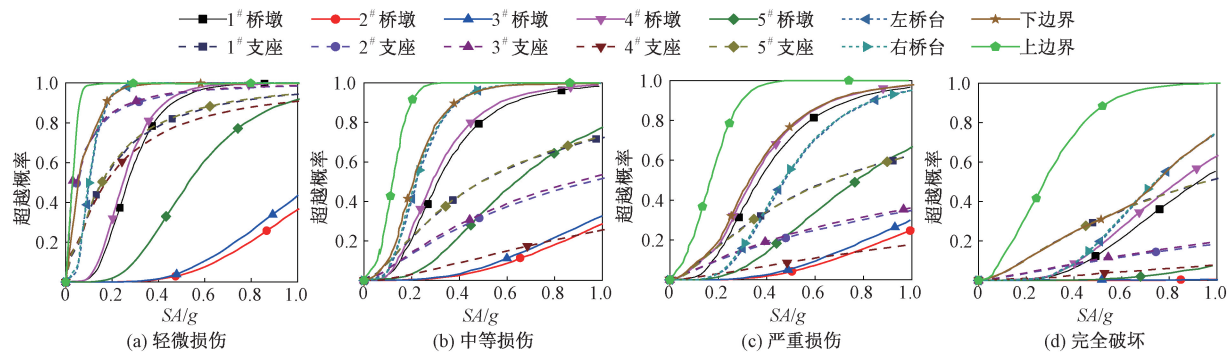


图 9 桥梁系统与各构件在不同损伤状态下的地震易损性曲线

Figure 9 Seismic fragility curves of the bridge system and each component in different damage states

损伤状态下,两个桥台易损性最大,其次为 1<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>桥墩,对于 2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>桥墩以及 4<sup>#</sup>支座最不易发生中等损伤;1<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>桥墩最易发生严重损伤,其次是两个桥台,SA=0.6g 时桥台发生严重损伤的超越概率为 60%,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>桥墩以及 4<sup>#</sup>支座严重损伤概率较小,SA=0.6g 时,1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>支座较 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>支座发生严重损伤的超越概率增大 25%;两个桥台和 5<sup>#</sup>支座完全破坏的概率较大,2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>桥墩发生完全破坏的概率较小。整体而言,该桥梁两个桥台相对薄弱,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>桥墩以及 4<sup>#</sup>支座在相同损伤状态下的超越概率低于其他构件。

5 结论

- (1) 桥墩的抗震性能与材料强度、墩高、墩梁连接方式及墩顶荷载等有关。由于桥墩高度与延性变形能力呈正相关,相同损伤状态下,低墩的抗震性能较差。在同座桥梁桥墩高度不一时,应提高低桥墩的抗震性能。
- (2) 墩顶支座的易损性受其延性及相邻支座的影响,由于桥墩与上部结构之间存在位移传递效应,桥台处支座相比于桥墩处支座,其易损性更大。SA=0.6g 时,1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>桥台处支座发生严重损伤的超越概率相较于 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>桥墩处支座明显升高 25%。
- (3) 相同强度地震作用下,桥梁不同构件易损性差异较大。2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>刚构墩发生严重损伤的概率最小,对于高墩多跨连续刚构桥,桥台易损性较大,而 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>高墩及 4<sup>#</sup>支座易损性较小。全寿命周期内耐久性损伤后,桥梁关键抗震构件桥墩轻微损伤、中等损伤及严重损伤的超越概率显著增大,完全破坏的超越概率变化较小。
- (4) 与单个构件相比,桥梁系统更易发生损伤。忽略各构件的相关性及其对全桥系统抗震性能的影响,采用单个构件易损性来评估桥梁易损性会高估桥梁抗震性能。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震性能评价细则: JTG/T 2231-02—2021[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for aseismic performance evaluation of highway bridges: JTG/T 2231-02—2021[S]. Beijing: China Communications Press, 2021.

[2] 梁岩, 闫士昌, 赵博洋, 等. 近断层高速铁路刚构桥地震易损性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(4): 80-85, 91.

LIANG Y, YAN S C, ZHAO B Y, et al. Seismic fragility analysis of rigid frame bridge near-fault high-speed railway[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2022, 43(4): 80-85, 91.

[3] 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 vulnerability analysis of typical continuous girder bridges of Chongqing-Kunming high-speed railway[J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(2): 297-305.

[4] 王君. 基于 IDA 的高速铁路连续梁桥地震易损性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.

WANG J. Seismic fragility study on the continuous beam bridge over high-speed railway based on IDA method[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2017.

[5] 陈伟, 王冠, 杜彦良, 等. 高速铁路连续梁桥近断层地震易损性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(2): 212-218.

CHEN W, WANG G, DU Y L, et al. Vulnerability analysis of the continuous high-speed railway bridge under near-fault earthquake[J]. Journal of Harbin engineering university, 2020, 41(2): 212-218.

[6] BASOEZ N, KIREMIDJIAN A S. Evaluation of bridge damage data from the Loma Prieta and Northridge, California 211 earthquakes [R]. New York: Multidisciplinary

Center for Earthquake Engineering Research, 1998; 1-163.

[7] 梁岩,闫佳磊,班亚云,等.多跨连续刚构桥梁地震易损性损伤指标计算方法[J].铁道科学与工程学报,2019,16(6):1466-1475.

LIANG Y, YAN J L, BAN Y Y, et al. Analysis of calculation method for seismic fragility index of multi span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16(6): 1466-1475.

[8] 夏玉领.耐久性损伤钢筋混凝土柱节点反复荷载试验研究[D].长沙:中南大学,2014.

XIA Y L. Experimental study under cyclic loading on durably damaged reinforced concrete column joint [D]. Changsha: Central South University, 2014.

[9] 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 J H. Study on seismic vulnerability analysis of normal beam bridge piers based on numerical simulation [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.

[10] 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 vulnerability of concrete bridges with durability damage in coastal waters[ D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.

[11] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER R O, 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.

[12] MACKIE K R, STOJADINOVIC B. R-factor parameterized bridge damage fragility curves [J]. Journal of bridge engineering, 2007, 12(4): 500-510.

[13] 中国工程建设标准化协会.混凝土结构耐久性评定标准:CECS 220—2007 [S]. 北京:中国计划出版社,2007.

China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for durability assessment of concrete structures: CECS 220—2007[S]. Beijing, 2007.

[14] CORNELL C A. Bounds on the reliability of structural systems[J]. Journal of the structural division, 1967, 93(1): 171-200.

[15] DITLEVSEN O, MADSEN H O. Structural reliability methods [M]. New York: Wiley, 1996:1-59.

Seismic Fragility Analysis of Multi-span Continuous Girder-rigid Frame Bridges

LIANG Yan, ZHANG Zhuohang, BAN Yayun, WANG Yan

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

**Abstract:** In order to study the seismic fragility of multi-span continuous girder-rigid frame bridges, based on OpenSEES platform, a non-linear seismic response analysis model of the actual bridge was established. Through incremental dynamic analysis, fragility curves of bridge components such as piers, supports, and abutments were established. Time-varying seismic fragility of piers of key anti-seismic components of bridges in the whole life cycle was analyzed. The failure probability of bridge structure system was estimated by boundary method, and system fragility of bridges was studied as an example. The analysis results showed that in the same damage state, 1<sup>#</sup> and 4<sup>#</sup> piers were more likely to be damaged, followed by 5<sup>#</sup> piers, and 2<sup>#</sup> and 3<sup>#</sup> piers had the least probability, as to the pier height, material strength and restraint of pier crest all affected its fragility. The bearing at abutment was more likely to cause damage than the bearing at pier; the slope of the fragility curves of the two abutments was larger, and there was no significant difference in their probability of the same damage. The probability of slight, medium and serious damage of pier increased significantly after endurance damage in the whole life cycle, moderate damage state beyond the probability increased by 3.1%, 11.3%, 20.9%, 29.1%, 34.1%, respectively, and severe damage state increased by 3.9%, 13.5%, 25.1%, 33.4%, 35.4%, respectively. Bridge systems were more fragile than individual components, and using the fragility of a single component to evaluate the fragility of the bridge could overestimate the seismic performance of the bridge.

**Keywords:** bridge engineering; seismic performance; fragility; pier; durability