

高菁阳.钢筋混凝土桥梁地震易损性评估模型设计[J].地震工程学报,2020,42(6):1402-1408.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1402

GAO Jingyang.Design of a Seismic Vulnerability Assessment Model for Reinforced Concrete Bridges[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1402-1408.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1402

钢筋混凝土桥梁地震易损性评估模型设计

高菁阳^{1,2}

(1. 石家庄职业技术学院, 河北 石家 050081; 2. 石家庄铁道大学, 河北 石家庄 050081)

摘要: 桥梁作为交通中不可或缺的一部分,对其地震易损性进行研究具有现实意义。针对当前桥梁地震易损性分析方法存在准确性待提升的问题,提出基于模糊评定的钢筋混凝土桥梁地震易损性评估模型。以桥梁结构层次、材料层次及边界层几方面为主对桥梁评估过程中的不确定性参数进行分析。以分析结果为依据,考虑到桥梁损失是一个比较模糊的概念,引入模糊数学中的模糊评定方法对桥梁地震易损性进行评估。融合位移下桥梁支座损伤分析、能量下桥墩损伤分析、周期下桥梁结构整体损伤分析,构建可以反映钢筋混凝土桥梁由局部到整体的多层次模糊易损性评估模型。通过实验对所建模型进行验证,结果显示:在纵向只发生轻微破坏,且轻微破坏的概率较小,基本处于完好状态。而在横向,发生轻微破坏的概率较大,甚至还可能发生中等破坏。在地震作用下,桥梁破坏也基本以轻微破坏和中等破坏为主,严重破坏的概率很小。

关键词: 钢筋混凝土; 桥梁; 地震; 易损性; 评估

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1402-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1402

Design of a Seismic Vulnerability Assessment Model for Reinforced Concrete Bridges

GAO Jingyang^{1,2}

(1. Shijiazhuang Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050081, Hebei, China;

2. Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050081, Hebei, China)

Abstract: Given that the vulnerability evaluation of bridges is indispensable for traffic hazard assessment, it is of practical significance to study the seismic vulnerability of bridges. Aiming to improve the accuracy of the current seismic vulnerability analysis methods of bridges, this study proposes a seismic vulnerability assessment model of reinforced concrete bridges based on fuzzy evaluation. The uncertain parameters in the bridge evaluation process are analyzed from the aspects of the bridge structure level, material level, and boundary layer. Based on the analysis results, considering that bridge loss is a relatively fuzzy concept, the fuzzy evaluation method in fuzzy mathematics is introduced to evaluate the seismic vulnerability of bridges. The damage analysis of bridge supports under displacement, the damage analysis of piers under energy, and the overall damage analysis of bridge structures under a certain period are combined. Then a multi-level fuzzy

收稿日期: 2019-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779069)

第一作者简介: 高菁阳(1983-),女(满族),河北宽城人,硕士研究生,讲师,研究方向: 土木工程。E-mail: lj523130@163.com。

vulnerability assessment model is constructed. The experimental results show that in the longitudinal direction, only slight damage occurs, and the probability of slight damage in this direction is small. In the transverse direction, the probability of slight damage is higher, and moderate damage may even occur. Under earthquake action, the bridge damage is mainly slight failure and moderate failure, and the probability of serious damage is very small.

Keywords: reinforced concrete; bridge; earthquake; vulnerability; assessment

0 引言

桥梁是交通体系中的枢纽工程,如果其遭到破坏将会使交通体系在一定程度上无法正常运转。当前是经济全球化时代,经济迅猛发展的中国交通业发展均衡,且四通八达,其中的桥梁建设对于国内经济发展而言起到了非常大的作用。我国处于太平洋地震带与欧亚板块地震带交汇地,是一个地震灾害频繁发生的国家,一旦桥梁损毁严重到了一定程度,会影响下一步救灾工作,因此不管是经济建设方面,还是大众人身安全方面,对桥梁地震易损性进行研究均十分必要^[1-2]。

地震易损性是指结构在不同强度的地震作用下发生超过某一极限破坏状态的条件概率。桥梁地震易损性研究需要选取一些影响因素,并与实际地震灾害和经验等结合,以此得到桥梁地震易损性评估结果。研究桥梁易损性主要目的为科学分析当前城市桥梁整体抗震性能,并保障震后可以正常运转,同时为新桥梁建设提供一些参考^[3]。当前为了更加有效地解决桥梁地震易损性研究问题,有关该方面的研究成果非常多。

宋帅等^[4]引入 Copula 函数,分离构件地震需求间相关程度与各个构件边缘概率分布函数,以此简化联合分布函数构建程序。依据桥墩和支座地震易损性分析,利用 Copula 联合概率分布函数,构建桥梁系统易损性变化曲线,同时将其与一阶界限法和 Monte Carlo 法研究结果进行比较,以验证所提方法可靠性。董俊等^[5]引入核密度评估法,对桥梁地震易损性进行研究。过程中,将某铁路典型 4 跨高墩刚构—连续梁桥当作工程背景,对该桥地震易损性进行相应分析。依据蒙特卡罗法所得结果,检验了所提方法的整体性能。刘强等^[6]由 PEER 数据库随机选出 20 条近场地震记录,获取海量随机地震—结构数据样本。融合不同破坏形态下桥梁损伤指标,基于结构性能和需求获取桥梁地震易损性变化曲线。

上述相关研究成果与实际情况拟合度有待提升,因此本文提出基于模糊评定的钢筋混凝土桥梁地震易损性评估模型。

1 钢筋混凝土桥梁地震易损性评估

1.1 不确定性参数分析

影响钢筋混凝土桥梁地震易损性评估的不确定性参数可细化为很多种类,本文将不确定性参数划分为桥梁结构层次和材料层次以及边界层几方面进行分析。

(1) 结构层次存在的不确定性

结构层次存在的不确定性主要体现在桥梁结构整体动力特性与响应。由结构动力学层面分析,和质量矩阵及刚度矩阵等有关的不确定性因素均能够归为这一类。在此,主要考量和构件宏观尺寸与阻尼比等有关的不确定性因素。

假设阻尼比服从正态分布,则桥梁结构层次的不确定性参数分布如表 1 所列。

表 1 桥梁结构层次的不确定性参数分布

Table 1 Uncertainty parameter distribution of bridge structure level

不确定性来源	随机变量	分布类型
容重系数	λ_w	正态
墩柱直径	D/m	正态
保护层厚度	c/m	正态
纵筋直径	d/mm	正态
阻尼比	ξ	正态

(2) 材料层次存在的不确定性

材料层次存在的不确定性影响主要体现在桥墩在地震影响下非线性滞回响应。根据上下结构与盖梁使用的弹性梁单元模型,在此主要考量下部结构墩柱纵向钢筋与混凝土材料不确定性影响。基于以往研究成果设定参数的随机分布,则材料层存在的不确定性参数分布如表 2 所列。

(3) 边界层存在的不确定性

针对钢筋混凝土桥梁结构抗震分析来说,边界非线性影响也是地震易损性评估的重要因素,由此需要对这些边界参数不确定性进行分析。经相关考虑,边界层次的不确定性参数分布如表 3 所列。

1.2 基于模糊评定的桥梁地震易损性评估

实际上,桥梁损失是一个比较模糊的概念,震害

表 2 材料层存在的不确定性参数分布

Table 2 Uncertainty parameter distribution of material layer

不确定性来源	随机变量	分布类型
纵向钢筋屈服比	B	对数正态
纵向钢筋屈服强度	f_y/MPa	对数正态
纵向钢筋弹性模量	E_s/MPa	对数正态
约束混凝土极限压应变	$\epsilon_{cu-core}$	对数正态
约束混凝土峰值压应变	ϵ_{c-core}	对数正态
约束混凝土峰值压应力	f_{cc}/MPa	对数正态
无约束混凝土极限压应变	$\epsilon_{cu-cover}$	对数正态
无约束混凝土峰值压应变	$\epsilon_{c-cover}$	对数正态
无约束混凝土峰值压应力	f_{c}/MPa	对数正态
混凝土初始切线弹性模量	E_c/MPa	对数正态

表 3 边界层次的不确定性参数分布

Table 3 Uncertainty parameter distribution at the boundary level

不确定性来源	随机变量	分布类型
桥台被动极限承载能力	P_{ult}/kN	均匀
桥台被动切线刚度值	$K_{Passive}/(\text{kN}/\text{m})$	均匀
桥台主动有效刚度值	$K_{active}/(\text{kN}/\text{m})$	均匀
挡块剪切钢筋的屈服强度值	f_{yv}/MPa	对数正态
挡块剪切钢筋极限强度值	y_{uv}/MPa	对数正态
挡块之间的间隙	δ/cm	均匀
碰撞有效刚度值	$K_{eff}/(\text{kN}/\text{m})$	对数正态

并没有十分显著的等级划分标准,且桥梁上的各个组成部分损伤程度存在差异性,根据不同方法针对桥梁易损性进行评估所得结果也存在差异^[7-8]。模糊数学是分析与处理模糊性与综合性效果比较好的理论与方法。鉴于此,结合 1.1 不确定性因素分析,综合考量桥墩和支座局部损伤以及桥梁整体损伤等各项指标,引入模糊数学方法中的综合判定,利用多指标和模糊损伤集合之间关系,构建桥梁多重模糊易损性评估模型。

设定钢筋混凝土桥梁多元模糊损伤的论域表达式为 $\mathbf{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$, 论域中模糊子集为 $\mathbf{B}' = b_1/v_1 + \dots + b_n/v_n$, 式中元素 v_i 代表损伤程度的等级, b_i 代表损伤等级 v_i 对 \mathbf{B}' 隶属度。综合考量 5 个等级损伤, 则模糊损伤的论域表达式为 $\mathbf{V} = \{\text{基本完好, 轻微损伤, 中等损伤, 严重损伤, 倒塌}\}$ 。桥梁结构的模糊损伤向量表达式为 $\mathbf{B}' = \{b_1, \dots, b_n\}$ 。假设存在 m 个损伤评估因素构建因素论域 $\mathbf{U} = \{u_1, \dots, u_m\}$, 设定的因素论域表达式为 $\mathbf{U} = \{\text{整体损伤指数, 墩柱损伤指数, 支座位移}\}$ 。基于因素模糊向量 $\mathbf{A} = \{a_1, \dots, a_m\}$ 综合考量各因素域 $u_i (i = 1, \dots, m)$ 针对评估等级产生的影响大小量度。利用论域 \mathbf{U}, \mathbf{V} 模糊关系, 评估 \mathbf{B}' 。

利用构建各评估因素 u_i 针对各个损伤等级隶属度, 构建 u_i 和模糊损伤论域间模糊关联性向量

$r_i = [r_{i1}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{im}]$, 式中 $r_{ij} = \mu_{ij}(u_i)$, r_i 描述的是基于单因素 u_i 针对 \mathbf{V} 的评估结果。各个因素 $u_i (i = 1, 2, 3)$ 对 \mathbf{V} 的模糊关联性向量结合能够构成模糊关系矩阵, 则有:

$$\mathbf{R} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

综合单因素评估结果 r_i , 能够给出总评估结果 $\mathbf{B}' = \mathbf{A} \times \mathbf{R}$, 则:

$$\{b_1, \dots, b_n\} = \{a_1, \dots, a_m\} \times \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

上述得到的 $\mathbf{B}' = \{b_1, \dots, b_n\}$ 即为求解的模糊损伤向量, $\mathbf{A} = \{a_1, \dots, a_m\}$ 即为针对不同因素设定的权重系数。 \mathbf{A} 中各个元素累加和是 1。引入模糊数学模型 $M(\cdot, +)$ 开展运算。

在评估过程中, 隶属度函数是正态型, 详细表达式为 $\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-t}{\tau}\right)^2}$, 且系数 k, t 能够基于下列原则确定:

- (1) 如果评估因素与平均值相等, 那么其隶属度为 1;
- (2) 首末因素论域的上限或者下限的隶属度函数合理调节取 1;
- (3) 中间因素论域的边界值隶属度取值 0.5。

综合考虑因素论域中各个损伤评估因子整体重要程度, 基于层次分析法, 取周期下钢筋混凝土桥梁地震损伤指数和能量下桥墩地震损伤指数、支座位移下地震损伤指数的影响因素模糊向量得到权重系数 \mathbf{A} 。

获取模糊损伤评估子集后, 能够分析桥梁地震损伤程度隶属各损伤等级大小。以满足桥梁矢量建设需求为目的, 需要获取桥梁综合损伤指数, 进而方便定性定量对桥梁损伤程度进行描述^[9-10]。以突出优势等级为目的, 使用评估子集各个隶属度幂为权, 根据加权平均法判定桥梁的综合损伤指数。

$$D'_g = \frac{\sum_{i=1}^5 b_i^k D'_i}{\sum_{i=1}^5 b_i^k} \quad (3)$$

其中: D'_i 代表桥梁整体损伤指数性能对象在 i 级损伤中的中值。

根据上述计算与分析, 钢筋混凝土桥梁地震易损性评估模型构建详细过程为:

- (1) 确定桥梁地震模糊损伤论域 $\mathbf{V} = \{v_1, \dots,$

v_n }, 用来表征不同损伤等级。论域中与模糊子集相应的模糊向量为 $\mathbf{B}' = \{b_1, \dots, b_n\}$;

(2) 确定因素论域 $\mathbf{U} = \{u_1, \dots, u_m\}$, 也就是确定桥梁损伤因素, 并给出对应模糊向量 $\mathbf{A} = \{a_1, \dots, a_m\}$, 物理意义为各个因素在损伤中占据的权重值;

(3) 利用动力时程分析法对结构反应进行计算, 得到各个损伤因素数值, 例如桥梁整体损伤指数;

(4) 对隶属函数 $\mu_{ij}(u_i)$ 进行计算, 获得根据隶属度构建的模糊关联性矩阵 \mathbf{R} ;

(5) 得到模糊损伤向量值 $\mathbf{B}' = \mathbf{A} \times \mathbf{R}$;

(6) 对桥梁结构综合性损伤指数 D'_g 进行计算, 根据 D'_g 定性地给出结构隶属某损伤等级, 完成综合性评估。

依据上述模糊损伤评估法, 能够判定每次钢筋混凝土桥梁地震下损伤指数, 利用该方法迭代同时进行统计, 最终能够得到桥梁地震下易损性评估值, 也就是地震作用下桥梁结构反应超过标准损伤状态而定义的桥梁承载能力条件概率:

$$P'_i = P' \left(\frac{\delta'_c}{\delta'_d} \leq 1 \right) \quad (4)$$

式中: δ'_c 代表桥梁承载力; δ'_d 代表桥梁响应需求。 δ'_c 、 δ'_d 均服从对数正态分布, 在指定阶段, 桥梁结构失效率概率 P'_i 表达式为:

$$P'_i = \Phi \left(\frac{-\ln(\bar{\delta}'_c / \bar{\delta}'_d)}{\sqrt{\beta'^2_c + \beta'^2_d}} \right) \quad (5)$$

式中: $\bar{\delta}'_c$ 代表桥梁承载力的平均值; $\bar{\delta}'_d$ 代表桥梁响应需求的平均值; Φ 代表一个标准的正态分布函数; β'_c 代表承载力的标准差; β'_d 代表响应需求的标准差。如果桥梁地震易损性曲线将地面峰值加速度当作自变量, 那么 $\sqrt{\beta'^2_c + \beta'^2_d}$ 取值为 0.5。

根据所求地震易损性曲线结果, 分析桥梁结构在地震作用下的量化指标情况, 同时根据参考文献 [11] 和式 (5) 分析, 将损伤指标作为破坏状态的规划参考, 其结果是对桥梁的破坏状态分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏五个等级。综上所述, 得到桥梁的地震易损性曲线, 以此实现钢筋混凝土桥梁地震易损性评估。

2 实验结果与分析

为验证基于模糊评定的钢筋混凝土桥梁地震易损性评估模型可靠性, 进行一次相关性实验。利用 Open SEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 软件模拟桥梁结构的地震响应。所测试的钢筋混凝土桥梁立面图与平面图如图 1 所示。具体情况为: 跨径布局设置在 120 m 内, 其内部共分为 4 个区域, 每个区域 30 m。桥梁上分为 6 车道桥面, 单幅桥宽设置在 19 m 内, 总体桥面宽度共为 43 m, 其中包含中间区域 5 m 宽的中央分隔绿化带。桥梁选址在高速路直线路段内, 因道路选址地势不平, 所以在桥面设置纵向 1.5% 的坡度, 单幅横坡坡度为 2%。因中心区域设置的 5 m 中央分隔绿化带, 本文研究中取单幅桥梁作为算例桥梁进行研究, 其具体布置如图 1 所示。该桥上部结构主梁为预应力 T 梁结构, 共分为 8 根 T 梁, 其排列呈现并排组状态, 具体材料由 C40 组成; 下部结构为普通排架墩, 每个墩由三根柱和帽梁构成。其中柱直径为 1.4 m, 帽梁矩形为 2 m × 1.6 m 组成。其材料为 C30, 桥墩高度为 10 m, 桥台由桩支撑。坝肩总高度为 9.7 m, 后壁高度为 2 m, 桥台低于该高度, 钢筋混凝土嵌岩桩 31.5 m, 深度 8.5 m。

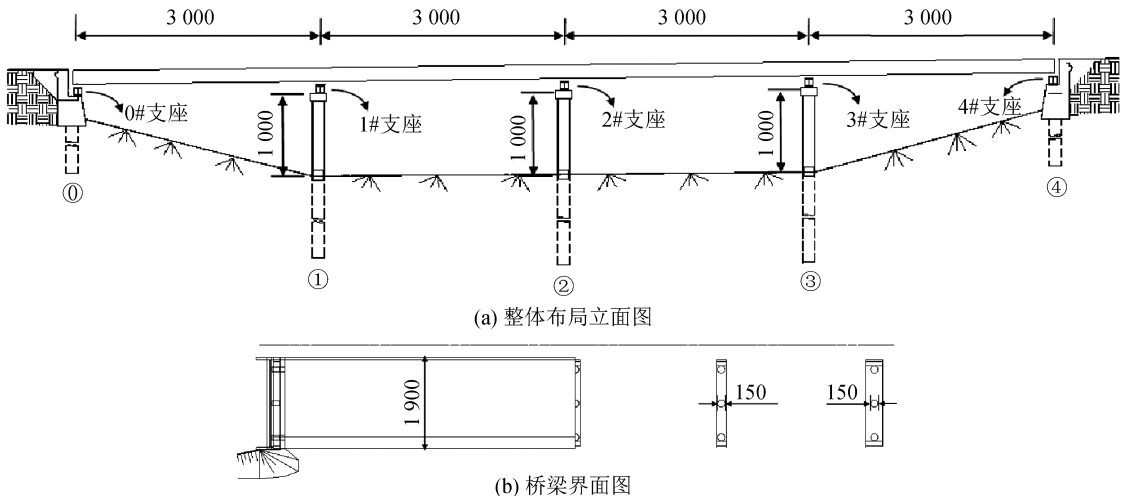


图 1 桥梁结构整体布置图及截面图

Fig.1 Overall layout and cross section of bridge structure

2.1 地震易损性曲线分析

根据图 2 可知,在轻微,中等,严重,完全这四个破坏等级中,桥梁失效概率随着破坏等级的变化而变化,其数值呈现负相关。无论是什么状态下的桥梁失效概率,其变化都随着地震强度的增加而呈现出非线性的增加,且与破坏等级相关联。在纵向状态下的完全破坏的桥梁在 0~1g 的失效概率大致为 0,中等破坏和严重破坏的失效概率也接近于 0,以上两者的区别为临界值不同,且临界值一直在变化;将桥梁的纵横状态对比分析,可知易损性曲线的

横向间隔在一定程度上大于纵向的易损性曲线间隔,表示桥梁在横向状态下的损伤程度更大,说明横向易损性曲线随地震等级的加强而呈现出不断上升趋势,在一定程度上速度值高于纵桥向易损性曲线,体现出地震动对横向失效概率和纵向失效概率的影响不同且横向大于纵向。

2.2 地震易损性曲面分析

依据 2.1 节求得桥梁地震易损性曲线拟合出桥梁的地震易损性曲面,其纵桥向破坏状态曲面图和横桥向破坏状态曲面图如图 3 和图 4 所示,其中

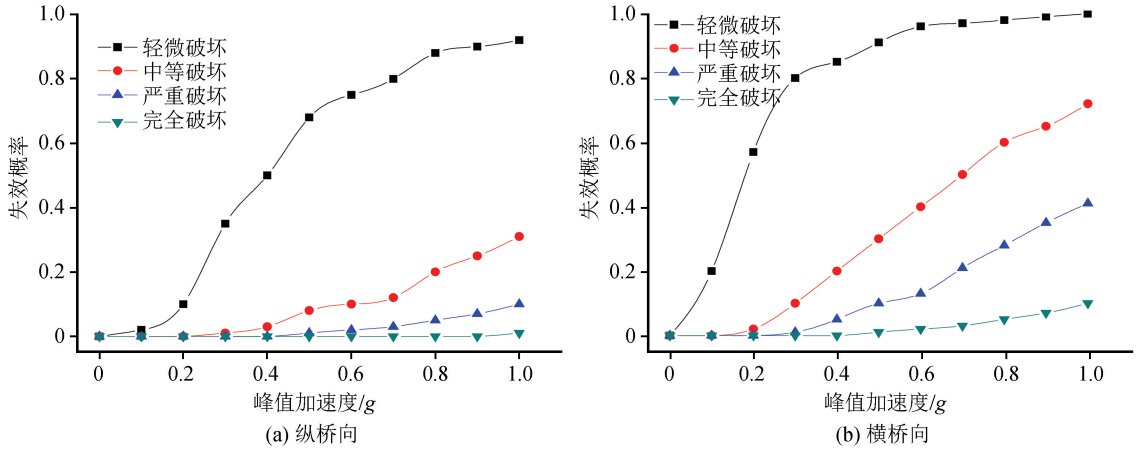


图 2 不同破坏极限状态地震易损性曲线

Fig.2 Seismic vulnerability curves with different failure limit states

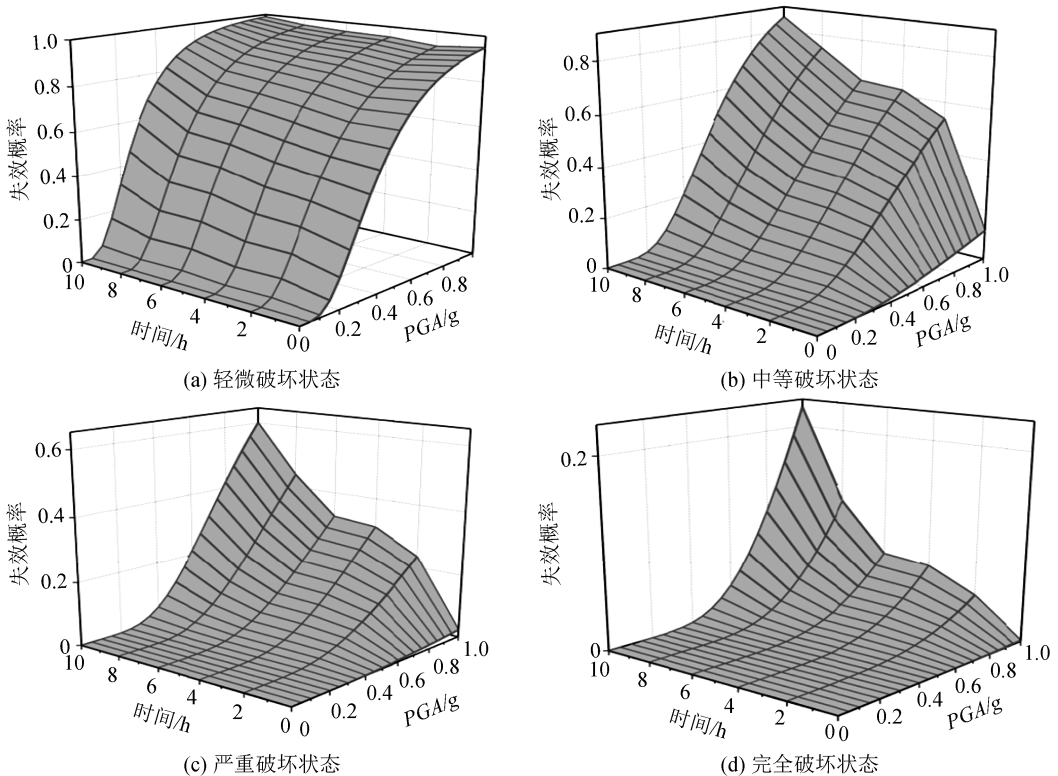


图 3 纵桥向破坏状态曲面图

Fig.3 Surface diagram of longitudinal failure state

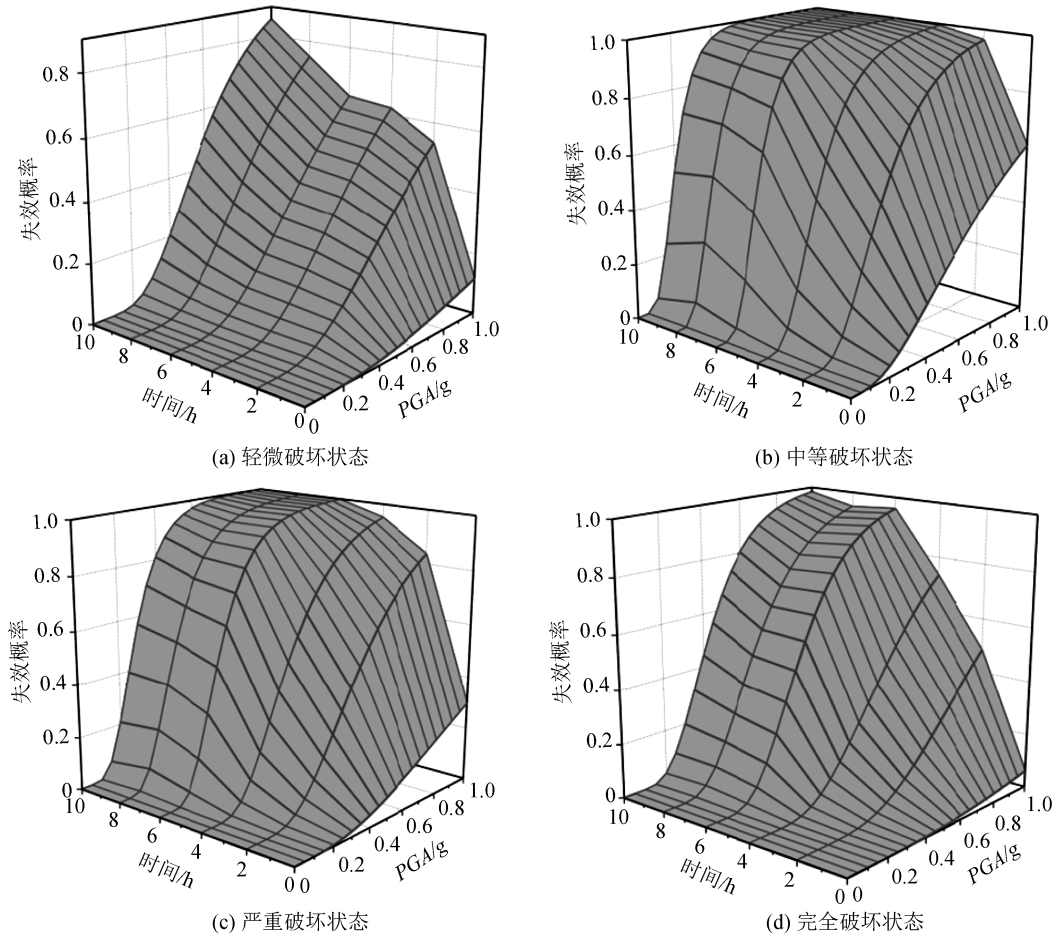


图 4 横桥向破坏状态曲面图

Fig.4 Surface diagram of transverse failure stat

x 轴表示地震振动强度, y 轴表示时间, z 轴表示破坏程度的失效概率。

从图 3 和图 4 可以看出,桥梁在横向与纵向状态下的破坏概率大部分随着地震能量的强度和 PGA 的增大而变化,其变化是非线性的且与破坏级别高低相关。随着破坏等级的增大,桥梁的失效概率不断减小。因此,自振周期对桥梁失效的影响也不可忽略。将纵向与横向的易损性曲面进行对比可知纵桥向的概率值小于横桥向,即在同等地震等级

条件下桥梁在横向发生破坏程度更高。

2.3 不同地震作用下失效概率统计

设置不同程度的地震考察桥梁结构的易损性,其地震加速度分别为:小震为 $0.06g$,中震为 $0.2g$,大震为 $0.46g$,可以求得桥梁在小震、中震、大震作用下的极限状态失效概率。

根据表 4 可知,桥梁的失效概率分为横向与纵向,且纵向状态的失效概率小于横向状态,在低等级地震的作用下,纵向的轻微等级破坏的概率都小于

表 4 不同地震作用下的失效概率统计

Table 4 Statistics of failure probability under different earthquake action

地震	纵桥向				横桥向			
	轻微	中等	严重	完全	轻微	中等	严重	完全
大震	0.652	0.035	0.004	0.000	0.931	0.274	0.073	0.006
中震	0.137	0.001	0.000	0.000	0.521	0.027	0.002	0.000
小震	0.003	0.000	0.000	0.000	0.052	0.000	0.000	0.000

3%,且横向状态下的概率都大于纵向状态。

3 结束语

地震灾害导致的损失巨大,因此针对钢筋混凝

土桥梁地震的易损性进行分析,引入模糊评定法评估桥梁地震易损性。以不确定性参数分析为依据,引入模糊数学方法中的综合判定实现桥梁地震易损性评估。实验结果显示,在从轻微、中等、严重及完

全破坏的四个等级的概率值中,轻微破坏状态下的概率对应最大值,完全破坏状态下的概率对应最小值。在同样的地震能量影响下,地震损伤概率值的变化随着破坏等级的变化而变化,通常情况下为负相关。横向的结构状态发生高等级破坏的概率大于纵向的结构状态,而在地震等级较小时,桥梁的纵向损伤等级相对较小,基本处于完好状态。除此之外,自振周期在一定程度上影响着桥梁失效,在以后的研究中,将针对多种桥梁进行所提模型适用性的验证,以实现模型评估桥梁易损性的一般性,同时将方法应用于多种桥梁的易损性评估,可为桥梁的抗震设计提供依据。

参考文献(References)

- [1] 张加庆.基于大数据的地震损失价值评估模型设计[J].地震工程学报,2018,40(2):356-362.
ZHANG Jiaqing.Design of Earthquake Loss Value Evaluation Model Based on Big Data[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(2):356-362.
- [2] 李立峰,吴文朋,胡思聪,等.考虑氯离子侵蚀的高墩桥梁时变地震易损性分析[J].工程力学,2016,33(1):163-170.
LI Lifeng, WU Wenpeng, HU Sicong, et al. Time-dependent Seismic Fragility Analysis of High Pier Bridge Based on Chloride Ion Induced Corrosion[J].Engineering Mechanics, 2016, 33(1):163-170.
- [3] 夏人杰,赵人达,占玉林.混凝土挡块对非规则连续梁桥梁地震反应的影响[J].铁道科学与工程学报,2018,15(8):1987-1995.
XIA Renjie, ZHAO Renda, ZHAN Yulin. Effect of Concrete Shear Keys on Seismic Responses of an Irregular Continuous Girder Bridge[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2018,15(8):1987-1995.
- [4] 宋帅,钱永久,吴刚.基于 Copula 函数的桥梁系统地震易损性方法研究[J].工程力学,2016,33(11):193-200,207.
SONG Shuai, QIAN Yongjiu, WU Gang. Research on Seismic Fragility Method of Bridge System Based on Copula Function [J].Engineering Mechanics, 2016,33(11):193-200,207.
- [5] 董俊,曾永平,单德山.核密度估计的桥梁结构地震易损性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):109-117.
DONG Jun, ZENG Yongping, SHAN Deshan. Seismic Fragility Analysis of Railway Bridge Using Kernel Density Estimation [J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 109-117.
- [6] 刘强,王妙芳,严通梅.近断层地震作用下钢筋混凝土连续梁桥地震易损性分析[J].力学与实践,2017,39(1):40-44.
LIU Qiang, WANG Miaofang, YAN Tongmei. Seismic Fragility of the Rc Continuous Girder Bridge under Near-fault Ground Motions[J].Mechanics in Engineering, 2017, 39(1):40-44.
- [7] 李正.基于率相关损伤模型的混凝土高墩桥梁地震响应分析[J].工程抗震与加固改造,2017,39(2):36-40,23.
LI Zheng. Seismic Analysis of RC High Pier Bridges Using Rate-dependent Damage Model[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(2):36-40,23.
- [8] 刘哲锋,王玉奎,袁豪健,等.钢筋混凝土梁的变幅滞回性能及其损伤评价[J].建筑结构学报,2017,38(11):132-141.
LIU Zhefeng, WANG Yukui, YUAN Haojian, et al. Damage Evaluation of RC Beams under Variable Amplitude Loading Histories[J].Journal of Building Structures, 2017,38(11):132-141.
- [9] 唐堂,钱永久.大跨度钢筋混凝土拱桥地震行波效应分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(2):111-116.
TANG Tang, QIAN Yongjiu. Traveling Response Analysis of Large-span Reinforced Concrete Arch Bridge [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016,36(2):111-116.
- [10] 柳春光,任文静,夏春旭.考虑钢筋腐蚀的近海隔震桥梁地震易损性分析[J].自然灾害学报,2016,25(6):120-129.
LIU Chunguang, REN Wenjing, XIA Chunxu. Vulnerability Analysis of Offshore Isolation Bridges Considering Reinforcement Corrosion [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(6):120-129.
- [11] 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.
- [12] 李泽霖,王元清,杨蔚彪,等.北京 CBD 文化设施建筑钢结构抗震性能时程分析[J].建筑结构,2018,48(5):71-73.
- [13] 钟茂华,田向亮,刘畅,等.基于结构方程模型的地铁乘客安全行为影响因素分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(1):5-11.
- [14] 陈大淀,石启印,范旭红,等.高强 U 形外包钢-混凝土组合连续梁极限受弯承载力试验研究[J].建筑结构,2018,48(4):45-49.