

钢管混凝土拱桥系统易损性研究

秦泗风^{1*}, 文 龙¹, 马存多¹, 徐春丽²

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 上海宝冶集团有限公司, 上海 200941)

摘要: 为准确评估钢管混凝土拱桥地震损伤, 将拱桥系统视为串-并联体系, 即将拱桥系统各关键体系进行串联, 而不同关键体系的单个构件之间则分别采用串联或并联形式。以某钢管混凝土拱桥为研究对象, 通过时程分析和神经网络预测获得拱桥各构件的地震响应值, 基于 Copula 函数分别得到拱桥各关键体系易损性和整体系统易损性, 并与基于一阶界限法得到的系统易损性进行对比。研究表明: 通过神经网络预测可以获得准确的拱桥结构地震响应值, 当地震动峰值加速度 A_{PG} 为 $0.4g$ 时, 预测准确率超过 90% , 并且随着 A_{PG} 的增大, 准确率逐渐提高; 拱桥各关键构件体系中, 拱上立柱体系失效概率最高, 在抗震设计时应对其采取减隔震措施, 风撑体系的失效概率最低, 进行拱桥系统易损性分析时可忽略风撑体系的影响; 基于串-并联体系的拱桥系统易损性介于一阶界限法上界和下界之间, 当 $A_{PG}=0.3g$ 时, 轻微、中等和严重损伤状态下串-并联体系的系统失效概率分别为 98% 、 94% 及 25% , 与一阶界限法上界的相对偏差分别为 -1.4% 、 -3.1% 及 -16% , 与下界的相对偏差分别为 0.6% 、 3% 及 11% , 钢管混凝土拱桥采用串-并联体系进行系统易损性分析明显更合理。

关键词: 钢管混凝土拱桥; 地震易损性; 串-并联体系; Copula 函数; 时程分析; 神经网络; 失效概率

中图分类号: U448.22⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)04-0047-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231101002

System Vulnerability of Concrete-Filled Steel Tubular Arch Bridges

QIN Sifeng^{1*}, WEN Long¹, MA Cunduo¹, XU Chunli²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Shanghai 200941, China)

*Corresponding author: qsifeng@163.com

Abstract: In order to accurately evaluate the seismic damage of concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridge, this paper regards the arch bridge system as a series-parallel system, that is, the key systems of the arch bridge system are connected in series, and the single components of different key systems are connected in series or in parallel. Taking a CFST arch bridge as the research object, the seismic response values of each component of the arch bridge are obtained by time-history analysis and neural network prediction. Based on the Copula function, the vulnerability of each key system and the overall system of the arch bridge are obtained respectively, and compared with the system vulnerability based on the first-order boundary method. The results show that the accurate seismic response value of arch bridge structure can be obtained by neural network prediction. When the peak ground acceleration $A_{PG}=0.4g$, the prediction accuracy rate exceeds 90% , and with the increase of A_{PG} , the accuracy rate gradually increases. Among the key component systems of the arch bridge, the failure probability of the arch column system is the highest, and the seismic isolation measures should be taken in the seismic design. The failure probability of the wind bracing system is the lowest, and the influence of the wind bracing system can be ignored in the vulnerability analysis

收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 辽宁省复杂结构系统灾害预测与防治重点实验室开放基金项目(DLSZD2024[003])

作者简介:

秦泗风(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: qsifeng@163.com。(通信作者)

文 龙(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震方面的研究。

of the arch bridge system. The vulnerability of the arch bridge system based on the series-parallel system is between the upper and lower bounds of the first-order boundary method. When the $A_{PG}=0.3g$, the failure probabilities of the series-parallel system under mild, moderate and severe damage conditions are 98%, 94% and 25%, respectively. The relative deviations from the upper bounds of the first-order boundary method are -1.4%, -3.1% and -16%, respectively, and the relative deviations from the lower bounds are 0.6%, 3% and 11%, respectively. It is obviously more reasonable to use the series-parallel system to analyze the vulnerability of the CFST arch bridge.

Keywords: concrete-filled steel tubular arch bridge; seismic vulnerability; series-parallel system; Copula function; time-history analysis; neural network; failure probability

地震易损性描述了结构的地震需求与抗震能力之间的关系^[1],当结构的地震需求超过其抗震能力时,容易受到损伤或破坏。作为基于性能评估的重要组成部分^[2-3],地震易损性的准确评估可有效揭示结构在不同地震需求下的表现,通过采取相应的抗震措施,降低地震导致的损失和风险。

对桥梁系统进行易损性分析时,首先通过概率地震需求分析建立对应构件的理论易损性曲线,再进一步得到构件体系和桥梁系统的易损性^[4]。对于复杂桥梁结构,任一构件损伤都会对桥梁系统整体功能造成影响^[5-6],且桥梁系统易损性大于单一构件的易损性^[7-8]。因此,探索能够考虑多个变量相关性的桥梁系统易损性研究方法,已成为众多学者关注的热点问题。其中,CHEN等^[9]考虑了不同构件地震需求的相关性,对桥梁系统损伤概率进行推导时,提出了一种基于Copula函数的地震易损性方法。KIM等^[10]采用二阶可靠性方法评估了考虑构件相关性的桥梁系统易损性分析,与一阶可靠性方法相比,其可以得到更为准确的结果。GAO等^[11]将连续梁桥假定为不同构件组成的体系,引入了多元Copula函数来计算桥梁体系的地震易损性,避免了单一构件易损性分析导致的整体系统易损性评估精度低的问题。REN等^[12]提出了一种改进的条件边际(probabilistic conditional marginal,PCM)方法,并将该方法应用于桥梁体系的易损性分析中。何浩祥等^[13]提出将连续桥梁视作由不同构件组成的串联体系,并基于Copula函数求得了桥梁系统的地震易损性,研究表明,该串联体系具有较高的准确性。综上所述,目前桥梁系统的易损性分析现状总结如下:(1)研究方法多样性(如一阶界限法、二阶界限法及Copula技术等);(2)构件相关性的选取(如构件线性相关、非线性相关及不考虑构件相关性);(3)组合形式多样性(如串联、并联及串-并联组合形式)。

近年来,国内外修建了大量的钢管混凝土拱桥,但对这类桥梁的系统易损性研究成果不多。因此,本文通过对钢管混凝土拱桥的组合形式进行假设,将拱桥各关键体系之间进行串联,而体系中各个子构件则选择串联或并联的形式。通过时程分析和神经网络来预测拱桥地震响应值,获得单个构件的易损性后,采用Copula函数对

同一体系不同构件及不同体系的相关性进行描述,进而得到桥梁系统的易损性。以某钢管混凝土拱桥为例,对该方法的适用性和准确性进行详细阐述,研究成果可为同类桥梁的地震易损性研究提供参考。

1 基本原理

1.1 神经网络方法

本文使用前馈神经网络(feedforward neural network,FNN)来预测拱桥地震响应值,以拱桥结构-地震动不确定性参数作为神经网络的输入数据,以通过时程分析(time-history analysis,THA)获取的地震响应值作为输出数据来训练神经网络。在FNN中,神经元按照层次结构排列,接收上一层的输入并生成输出传递给下一层。每个神经元都有一组权重和偏置,它们用于调整输入信号的权重和偏移量,从而影响神经元的激活状态。FNN的训练过程通常采用反向传播算法,该算法通过梯度下降的方法来最小化损失函数,从而使神经网络能够学习输入与输出之间的映射关系。

1.2 拱桥系统的串-并联体系

钢管混凝土拱桥中的关键构件包括桥墩、拱肋、立柱、风撑和吊杆。通过评估不同构件的损伤程度及震后修复情况,将这些构件的连接方式假设为串-并联组合形式。

首先,串联体系是指将关键构件的子构件作为串联的闭环连接起来。在拱桥中,桥墩系统和拱肋系统可以视作串联体系,桥墩系统和拱肋系统的损伤或倒塌将影响桥梁的震后使用性能。桥墩系统包括多个桥墩,它们按照一定的间距沿拱桥长度方向排列,并通过与拱肋连接形成一个闭环。拱肋系统作为拱桥的主要承重构件,由多个拱肋组成,这些拱肋与桥墩相连接,形成一个稳定的结构。通过这种串联的连接方式,拱桥能够承受桥面荷载并将其传递至桥墩系统上,从而确保桥梁的稳定性和承载能力。

其次,立柱系统、风撑系统和吊杆系统可视为并联体系,其子构件以并联的形式连接。在并联体系中单个子构件的损伤对体系影响较小,且容易修复。立柱系统由多个立柱组成,这些立柱与桥面系统、桥墩系统和拱肋系统相连接,起到支撑和稳定桥梁的作用。风撑系统和吊

杆系统则起到提高桥梁刚度和稳定性的作用。这些系统中的子构件以并联形式连接,能够共同承担荷载,并通过平行的力传递路径来提高整个桥梁系统的稳定性。

综上所述,钢管混凝土拱桥中不同系统之间以串联的形式进行连接,而同一系统则可分为串联或并联形式连接。串联系统负责荷载的传递和结构的稳定性;而并联系统则负责整个桥梁系统的刚度和稳定性。这一假设不仅确保了拱桥能够有效承受荷载并保持稳定,还充分发挥了各构件的作用。钢管混凝土拱桥串-并联组合形式的基本原理如图1所示。

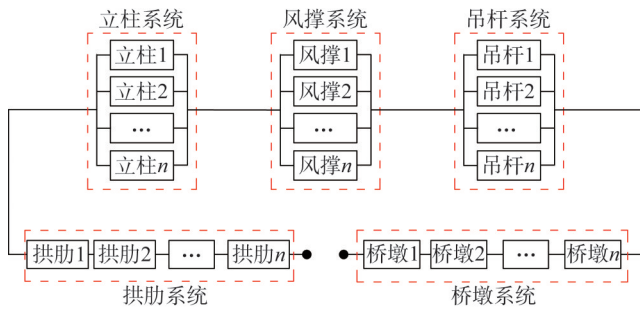


图1 钢管混凝土拱桥串-并联体系

Fig. 1 Series-parallel system of concrete-filled steel tubular arch bridge

1.3 地震易损性分析

在进行地震易损性分析时,通常假设结构地震需求和抗震能力服从对数正态分布,对于桥梁的单个子构件,其地震易损性可表示为^[14]:

$$P_i = P(D \geq C | I_M) = \Phi \left(\frac{\ln D | I_M - \ln C}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right) \quad (1)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态函数; D 为随机地震作用下结构的地震需求; C 为地震作用下结构的抗震能力; I_M 为地震动强度指标; $\beta_{D|IM}$ 、 β_C 分别为结构的地震需求和抗震能力对数标准差。

地震需求 D 和地震动强度 I_M 之间的关系可以描述为^[15]:

$$\ln D | I_M = b \ln I_M + \ln a \quad (2)$$

式中: a 、 b 为线性回归系数。

将式(2)代入式(1)中, P_i 进一步表示为:

$$P_i = \Phi \left(\frac{b \ln I_M + \ln a - \ln C}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right) \quad (3)$$

拱桥关键构件中桥墩系统和拱肋系统各个子构件采用串联体系,其地震易损性表达式为:

$$P_{串} = \bigcap_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

式中: \cup 表示并集; P_i 为桥墩或拱肋系统中单个子构件的易损性。吊杆、立柱和风撑系统中每个子构件则采用并联的形式连接,其地震易损性表达式为:

$$P_{并} = \bigcap_{j=1}^n P_j \quad (5)$$

式中: \cap 表示交集; P_j 为并联体系中子构件的易损性。

联立式(4)及式(5),拱桥系统在串-并联体系下的地震易损性 P_{sy} 可以表示为:

$$P_{sy} = \bigcup \left(P_{桥墩}, P_{拱肋}, P_{立柱}, P_{风撑}, P_{吊杆} \right) = \bigcup \left(\bigcap_{i=1}^n P_{桥墩}, \bigcap_{i=1}^n P_{拱肋}, \bigcap_{j=1}^n P_{立柱}, \bigcap_{j=1}^n P_{风撑}, \bigcap_{j=1}^n P_{吊杆} \right) \quad (6)$$

1.4 Copula 函数

在钢管混凝土拱桥中,由于桥墩、拱肋和风撑等构件在地震作用下相互影响,因此,不能简单地以单个构件的损伤概率来代替拱桥系统的地震易损性。为了准确表达构件之间的相关性,引入能够考虑多个变量相关性的 Copula 函数对拱桥系统进行地震易损性分析。

1.4.1 Copula 函数的定义

已知随机变量 $X=(X_1, X_2, \dots, X_m)$, 假设 m 维联合分布函数 F 的边缘分布函数分别为 F_1, F_2, \dots, F_m , 对于任意 $x=(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 存在 Copula 函数 C 满足:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_m) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_m(x_m)] \quad (7)$$

式中: $F(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为多元变量的联合分布函数。

本文采用阿基米德族的 Gumbel、Clayton 及 Frank Copula 函数和椭圆族的 Gauss Copula 函数作为备选的连接函数,以上 Copula 函数的表达式分别为^[16-17]:

$$C_G(u_1, u_2; \alpha) = \exp \left\{ - \left[(-\ln u_1)^{1/\alpha} + (-\ln u_2)^{1/\alpha} \right] \right\} \quad (8)$$

$$C_{Cl}(u_1, u_2; \theta) = (u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} - 1)^{-1/\theta} \quad (9)$$

$$C_F(u_1, u_2; \lambda) = -\frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\lambda u_1} - 1)(e^{-\lambda u_2} - 1)}{e^{-\lambda} - 1} \right] \quad (10)$$

$$C(u_1, u_2; \rho) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left[\frac{-(r^2 + s^2 - 2\rho rs)}{2(1-\rho^2)} \right] dr ds \quad (11)$$

式中: α 、 θ 、 λ 和 ρ 分别为 Gumbel、Clayton、Frank 和 Gauss Copula 函数的相关参数。

1.4.2 Copula 函数选取与检验

不同 Copula 函数的相关结构具有一定差异,需选择

合适的 Copula 函数对变量之间的相关性进行描述。本文结合不同 Copula 函数的特点及不同构件边缘分布频数直方图进行选择,借助平方欧式距离 d^2 对不同 Copula 函数进行检验。首先,采用极大似然估计法计算 Copula 函数的相关参数。极大似然估计法的表达式为:

$$\hat{\alpha} = \arg \max \sum_{i=1}^n \ln c(u_{1i}, u_{2i}, \dots, u_{ni}, \alpha) \quad (12)$$

式中: c 为 Copula 函数的概率密度函数; α 为相关参数; u 为变量的边缘分布。

确定 Copula 函数的相关参数后,对样本经验 Copula 函数进行定义,其表达式为:

$$\hat{C}(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I[F_n(x_i) \leq u] I[G_n(y_i) \leq v] \quad (13)$$

式中: $\hat{C}(u, v)$ 为经验 Copula 函数, u, v 为经验 Copula 函数的自变量; $I(\cdot)$ 为示性函数。进一步求得平方欧式距离 d^2 , 其表达式为:

$$d^2 = \sum_{i=1}^n |\hat{C}_n(u, v) - C(u, v)|^2 \quad (14)$$

1.4.3 基于 Copula 函数的系统易损性

通过对 Copula 函数的选取与检验,选择最佳 Copula 函数来考虑构件之间的相关性。两个构件同时失效的概率为:

$$\begin{aligned} & P[g_1(X) \leq 0, g_2(X) \leq 0] \\ &= P\{F_1[g_1(X)] \leq F_1(0), F_2[g_2(X)] \leq F_2(0)\} \\ &= C[F_1(0), F_2(0)] \\ &= C(P_1, P_2) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $g(X)$ 为构件的功能函数。因此,多个构件同时失效的易损性表示为:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = C(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (16)$$

对于串联系统,其地震易损性可表示为:

$$\begin{aligned} P_{sy} &= \sum_{i=1}^n P(X_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq m} P(X_i X_j) + \\ &\quad \sum_{1 \leq i < j < k \leq m} P(X_i X_j X_k) + \dots + \\ &\quad (-1)^{m-1} P(X_1 X_2 \dots X_m) \end{aligned} \quad (17)$$

式中: X_m 为串联系统中的随机变量。并联系统的易损性表示为:

$$P_{sy} = P(X_1 X_2 \dots X_n) \quad (18)$$

式中: $P(\dots)$ 为多个构件同时破坏的概率; X_n 为并联系统中的随机变量。

2 钢管混凝土拱桥分析模型及不确定性

2.1 工程概况及有限元建模

本文以某钢管混凝土拱桥为实例,主桥中跨、次边跨、边跨的跨度分别为 188 m、138 m 和 36 m,矢高分别为

54 m、28 m 和 7 m。上弦杆、下弦杆、腹杆、风撑、拱上立柱均采用 Q345 钢,其中,上弦杆、下弦杆和拱上立柱内部填充 C50 混凝土。拱桥中跨和次边跨风撑数量分别 5 道和 3 道,风撑采用钢管桁架结构,与拱圈刚性连接。

基于 midas Civil 平台建立拱桥数值模型,其中吊杆和系杆采用桁架单元模拟,桥面板采用板单元模拟,桥墩、拱上立柱、拱肋等采用非线性梁单元模拟。拱肋和拱上立柱等钢和混凝土叠合材料按照“统一理论”换算为一种材料,钢材采用双折线模型^[18],混凝土采用 Mander 模型^[19],如图 2 所示,不考虑桩-土-结构相互作用。拱桥结构采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比取 0.03^[20]。全桥节点共 12 338 个,单元共 15 473 个,拱桥计算模型如图 3 所示。

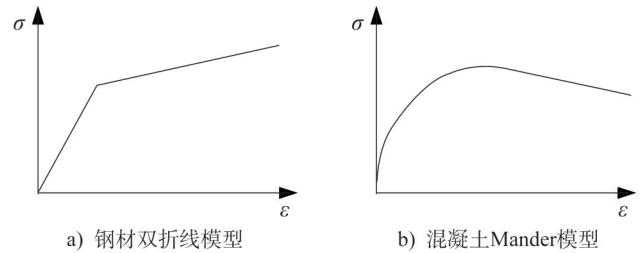


图 2 钢材、混凝土本构模型

Fig. 2 Constitutive models of steel and concrete

2.2 结构不确定性

钢管混凝土拱桥结构的不确定性可分为材料和几何尺寸两个方面。材料不确定性主要包括钢材屈服强度、弹性模量以及混凝土抗压强度和吊杆弹性模量等关键参数。几何尺寸的不确定性主要涉及拱上立柱、风撑和弦杆等构件的壁厚和直径。表 1 所示为拱桥结构不确定性的主要参数概率分布^[21-24]。

2.3 地震动不确定性

考虑到桥梁结构所受地震动的随机性,在进行地震响应分析时,需要重视地震动的不确定性。使用较多的地震动记录可以更好地反映地震动的变化和不确定性,从而得到更准确的分析结果。本文从 NGA-West2 强震数据库中选择了 120 组地震动记录,以满足概率统计分析的要求。地震动记录应涵盖广泛的地震参数,如震级、震中距和持时等,以较为真实地反映不同地震情况。本文采用地面峰值加速度作为地震动强度指标。地震动的加速度反应谱和主要参数统计情况如图 4 所示。

3 构件损伤状态定义及 Copula 函数选取

3.1 损伤状态定义

在地震作用下,拱桥桥墩、拱肋和拱上立柱等结构容易产生压弯破坏,参考文献[25-26]的研究,本文采用曲率延性比 μ 对拱桥压弯构件的损伤指标进行定义,而吊

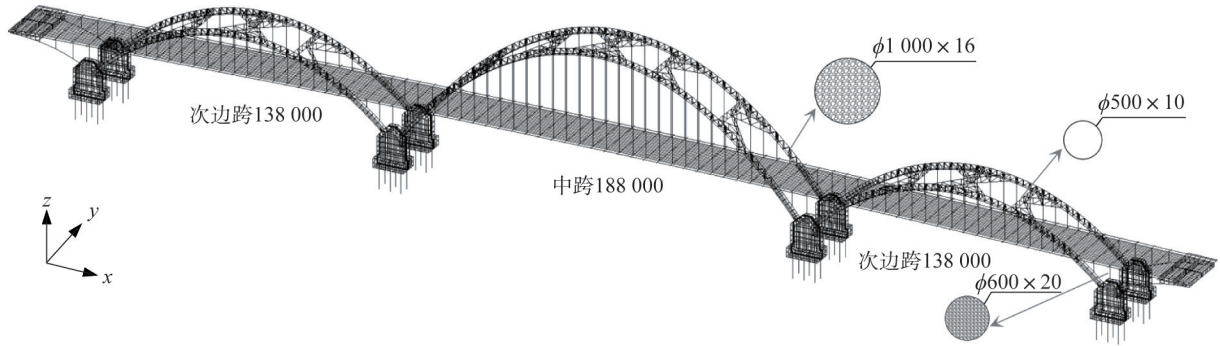


图3 钢管混凝土拱桥三维示意图(单位:mm)

Fig. 3 Three-dimensional schematic diagram of concrete-filled steel tubular arch bridge (unit: mm)

表1 拱桥结构不确定性参数

Table 1 Uncertainty parameters of arch bridge structure

模型参数	平均值	变异系数	分布类型
钢材屈服强度/MPa	389.9	0.70	对数正态
钢材弹性模量/GPa	206	0.10	正态
C50混凝土最大应力/MPa	50	0.14	正态
吊杆弹性模量/GPa	195	0.10	正态
阻尼比	0.03	0.10	对数正态
上弦杆壁厚/mm	16	0.05	正态
下弦杆壁厚/mm	12	0.05	正态
拱上立柱壁厚/mm	20	0.05	正态
风撑壁厚/mm	10	0.05	正态

杆则采用地震作用下和自重状态下的轴向应变比作为损伤指标,轻微、中等和严重损伤对应的轴向应变比取值分别为2.00、2.25和2.50^[27]。通过有限元软件得到拱桥压弯构件的 $M-\phi$ 曲线,进而确定不同损伤状态对应的曲率。图5为拱上立柱的弯矩-曲率曲线。

对于单一构件,其截面弯矩和曲率的关系为:

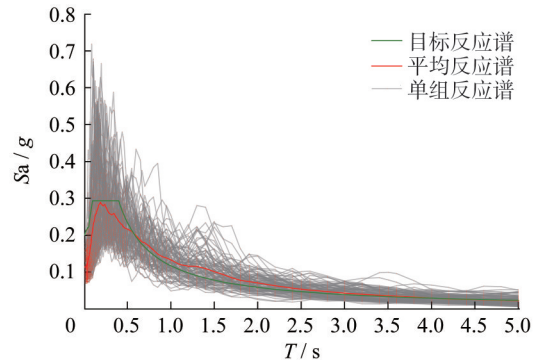
$$\phi = \frac{M}{EI} \quad (19)$$

式中: ϕ 为曲率; M 为截面弯矩; EI 为抗弯刚度。对于钢管混凝土材料,其抗弯刚度 EI 可表示为:

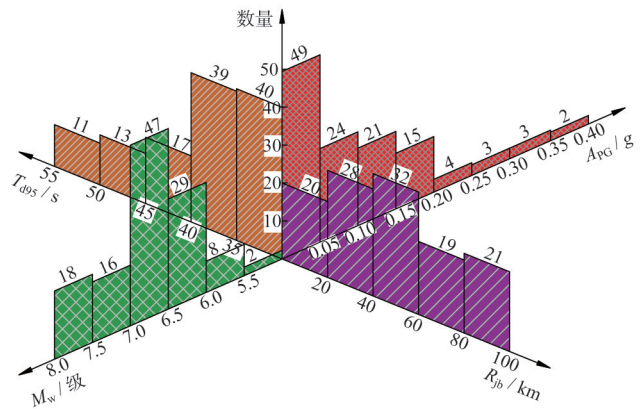
$$EI = E_s I_s + 0.6 E_c I_c \quad (20)$$

式中: E_s 、 E_c 分别为钢管和混凝土的弹性模量; I_s 、 I_c 分别为钢管和混凝土的截面惯性矩。

通过时程分析得到各构件的截面弯矩,由式(19)求出对应的曲率。其中,曲率延性比 μ 为研究对象危险截面对应曲率 ϕ 与该构件首次屈服时的曲率 ϕ'_y 的比值,即:



a) 地震动单组反应谱与目标反应谱



b) 地震动统计情况

图4 地震动参数统计情况

Fig. 4 Statistics of ground motion parameters

$$\mu = \frac{\phi}{\phi'_y} \quad (21)$$

根据 μ 值来划分各损伤等级,如表2所示。

3.2 最佳 Copula 函数的选取

本文选择拱桥各构件损伤指标作为分析依据,采用图形法初步选取合适的 Copula 函数。图6给出了拱肋和拱上立柱以及拱肋和吊杆的二维频数直方图。

从图6可以看出,不同构件组合的频数直方图呈现

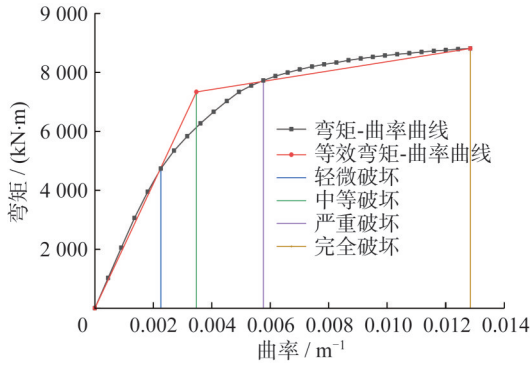


图5 拱上立柱弯矩-曲率曲线

Fig. 5 Bending moment-curvature curves of column on arch

表2 构件不同损伤状态对应的曲率延性比

Table 2 Curvature ductility ratios corresponding to different damage states of components

构件	损伤指标	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
		$\mu_{cy1} < \mu \leq \mu_{cy}$	$\mu_{cy} < \mu \leq \mu_4$	$\mu_4 < \mu \leq \mu_{cmax}$	$\mu > \mu_{cmax}$
桥墩	μ_1	1.00	2.15	5.36	12.76
风撑	μ_2	1.00	1.49	2.92	8.13
立柱	μ_3	1.00	1.29	3.68	7.60
拱肋	μ_4	1.00	1.54	2.55	5.69

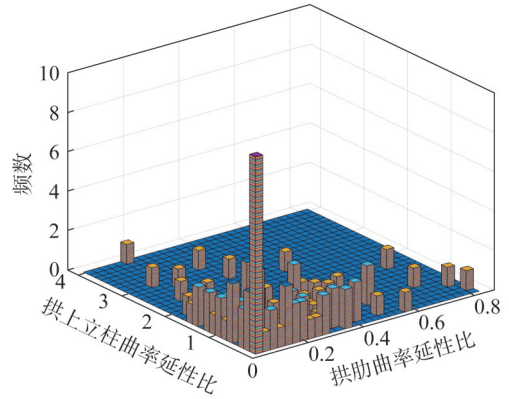
注： μ_{cy1} 、 μ_{cy} 、 μ_4 、 μ_{cmax} 分别为拱桥压弯构件截面首次屈服、等效屈服、混凝土压应变 ϵ_c 为0.004及截面最大屈服状态对应的曲率延性比。

出非对称的尾部特性,且下尾部相关性较为明显,而Clayton-Copula函数可以迅速地感知具有下尾部相关性的随机变量间的相依结构。在检验过程中,计算得到拱肋和拱上立柱的经验Copula函数与Gauss、Frank、Gumbel和Clayton-Copula函数的平方欧式距离分别为0.410 8、0.550 3、0.804 0和0.315 4。因此,结合频数直方图和平方欧式距离的检验结果,选择Clayton-Copula函数来描述拱桥各构件之间的相关性。图7给出了拱肋和拱上立柱的Clayton-Copula概率密度分布。

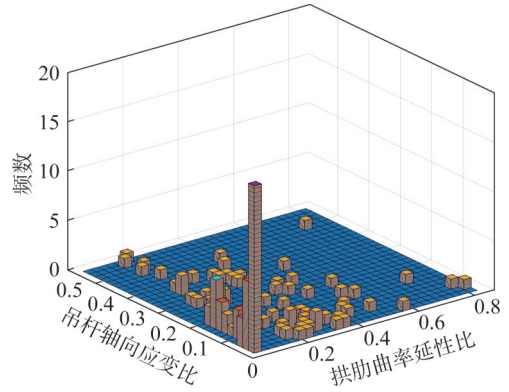
4 拱桥地震易损性分析

4.1 基于THA和FNN的构件地震易损性曲线对比

本文使用拉丁超立方抽样生成120个拱桥结构样本,并与120组地震动进行随机组合,形成拱桥结构-地震动样本对,其中,60组样本对用于时程分析,剩余60组样本通过FNN预测得到拱桥构件的地震响应值。取 A_{PG} 为易损性曲线的自变量,由式(3)建立拱桥各关键构件的



a) 拱肋和拱上立柱的频数直方图



b) 拱肋和吊杆的频数直方图

图6 不同构件的二维频数直方图

Fig. 6 Two-dimensional frequency histograms of different components

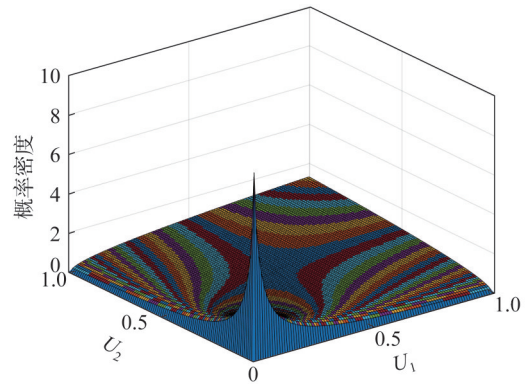


图7 二元Clayton-Copula函数概率密度

Fig. 7 Probability density of bivariate Clayton-Copula function

子构件在不同损伤状态下对应的易损性曲线。限于篇幅,图8仅列出拱肋、拱上立柱和吊杆系统中最易受损的单个子构件的易损性曲线。

如图8所示,对FNN预测获取的拱桥地震响应值进行损伤分析,所得的易损性曲线与时程分析得到的易损性曲线具有很好的一致性。在拱桥各构件中,拱上立柱单个构件的失效概率最高,拱肋和吊杆构件均具有较好的抗震性能。

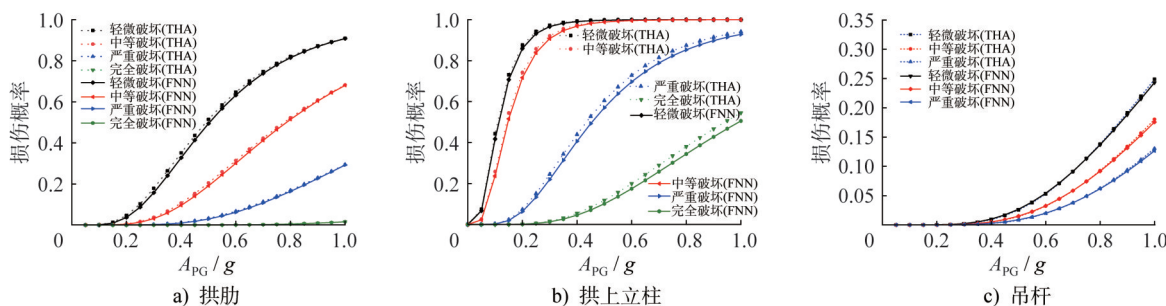


图8 拱桥构件易损性曲线

Fig. 8 Vulnerability curves of arch bridge components

图9给出了中等损伤状态下拱肋、拱上立柱和吊杆在时程分析与FNN预测结果下的相对误差。结果表明,当 $A_{PG} < 0.6g$ 时,吊杆和拱肋的相对误差偏大,拱上立柱的相对误差则偏小。当 $A_{PG} = 0.3g$ 时,FNN预测结果与时程分析结果的相对误差小于20%,当 $A_{PG} = 0.4g$ 时,二者的相对误差则小于10%,且随着 A_{PG} 的增加,各构件对应的相对误差逐渐减小,表明FNN预测具有较高的准确性,适用于拱桥构件的易损性分析研究。

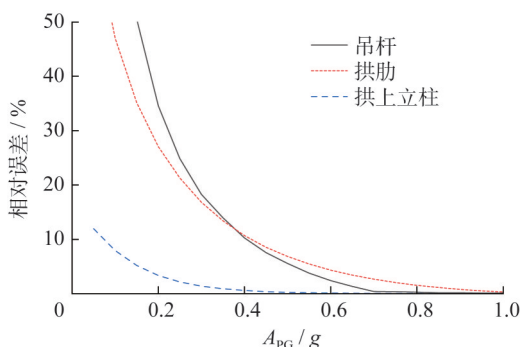


图9 不同构件THA与FNN预测结果的相对误差
Fig. 9 Relative errors between THA and FNN prediction results of different components

4.2 构件体系易损性

通过时程分析和FNN预测得到拱桥各构件的地震响应值,再根据式(3)求出对应构件的地震易损性值,在此基础上,结合式(17)、(18)分别求出串联系统和并联系统对应关键构件的体系易损性曲线,如图10所示。

由图10可以看出,拱桥各构件体系易损性分析中,拱上立柱体系最容易发生损坏,而风撑体系的失效概率最低。当 $A_{PG} = 0.1g$ 时,拱上立柱体系轻微损伤和中等损伤的失效概率分别为41%、24%,当 $A_{PG} = 0.3g$ 时,对应的失效概率分别为97%、91%,故应对拱上立柱采取必要的减隔震措施。当 $A_{PG} = 1.0g$ 时,风撑体系轻微损伤的失效概率不足0.1%,故在进行拱桥系统地震易损性分析时可以忽略风撑体系的影响。

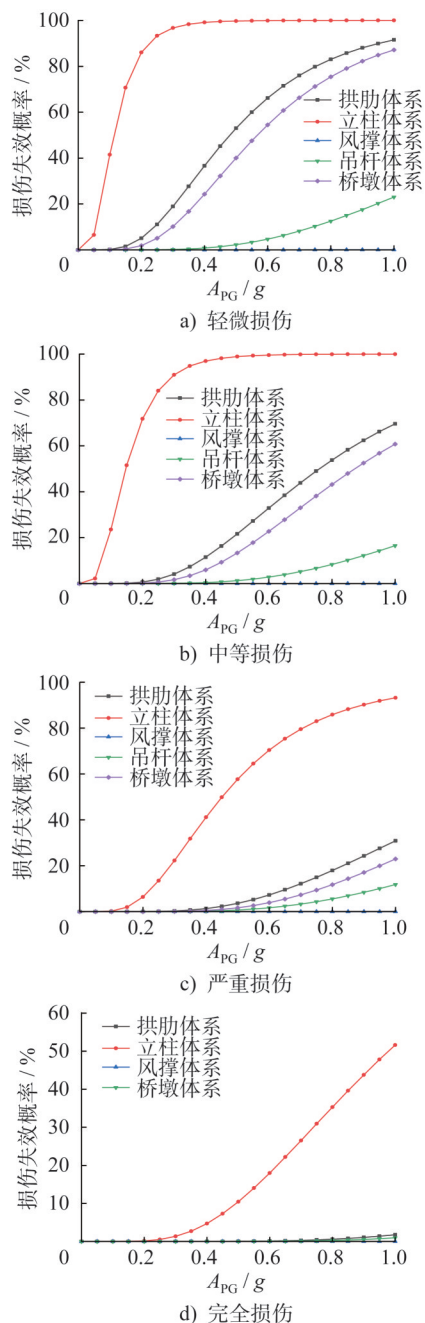


图10 拱桥构件体系易损性曲线

Fig. 10 Vulnerability curves of arch bridge component system

图 11 给出了中等损伤状态下拱桥各体系易损性与对应子构件易损性的变化情况,其中,吊杆体系的变化较为明显,而立柱体系的变化并不显著。拱肋和桥墩体系的失效概率大于对应单个构件的失效概率,而立柱和吊杆体系则相反。随着 A_{PG} 的增加,各构件易损性与相应体系易损性之间的变化率逐渐减小。

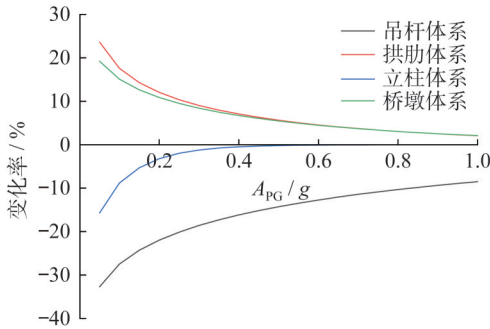


图 11 构件易损性与体系易损性的变化率

Fig. 11 Change rates of component vulnerability and system vulnerability

4.3 拱桥系统易损性

得到拱桥桥墩、拱肋、立柱及吊杆体系的易损性后,结合式(17)建立基于 Copula 函数的拱桥串-并联体系系统易损性曲线,并与基于一阶界限法得到的系统易损性进行对比,如图 12 所示。

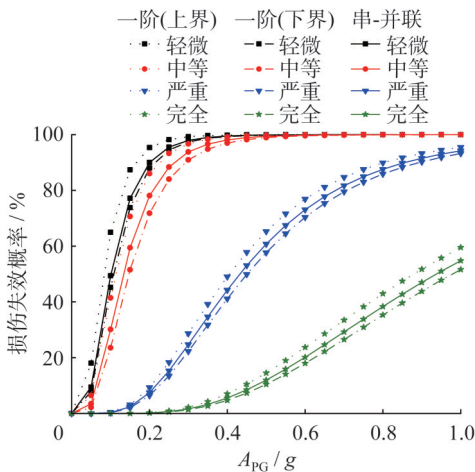


图 12 拱桥系统地震易损性曲线

Fig. 12 Seismic vulnerability curves of arch bridge system

一阶界限法的下界假定各构件体系之间完全相关,上界则忽略构件体系之间的相关性^[28],其表达式为:

$$\max_{x=1}^n [P_x] \leq [P_{sys}] \leq 1 - \prod_{x=1}^n [1 - P_x] \quad (22)$$

式中: P_x 为构件体系 x 的失效概率; P_{sys} 为拱桥系统的失

效概率; n 为构件体系的数量。

由图 12 可知,4 种破坏状态下,基于 Copula 函数的拱桥串-并联体系系统易损性曲线介于一阶界限法得到的易损性曲线的上、下界之间。当 $A_{PG}=0.1g$ 时,轻微、中等和严重损伤对应的串-并联体系下的失效概率分别为 49.4%、30.1% 和 0.3%,与一阶界限法上界的相对偏差分别为 -32%、-38% 和 -43%,与下界的相对偏差分别为 9%、27% 和 28%。当 $A_{PG}=0.3g$ 时,串-并联体系系统失效概率对应轻微、中等和严重损伤状态下的概率分别为 98%、94% 和 25%,与一阶界限法上界的相对偏差分别为 -1.4%、-3.1% 和 -16%,与下界的相对偏差分别为 0.6%、3% 和 11%。

综上所述,拱桥串-并联体系系统的易损性接近于一阶界限法的下界,若忽略拱桥各体系之间的相关性,则会高估拱桥整体系统的易损性。反之,若假定拱桥各体系之间完全相关,则会低估拱桥整体系统的易损性。

5 结论

本文将钢管混凝土拱桥系统视为串-并联体系,通过时程分析和 FNN 预测得到拱桥结构地震响应值,分别基于 Copula 函数和一阶界限法对拱桥系统进行系统易损性研究,主要结论如下:

(1) 拱桥各构件地震响应值对应的损伤指标频数分布图中,下尾部相关性较为明显,故采用 Clayton-Copula 函数对拱桥各构件之间的相关性进行描述比较合适。

(2) 采用 FNN 预测的地震响应值进行构件易损性分析能够获得较高的准确性,且随着地面峰值加速度的增大,准确性不断提高。

(3) 在拱桥各构件体系中,拱上立柱体系的失效概率最高,其次分别为拱肋体系、桥墩体系、吊杆体系和风撑体系,抗震设计时应应对拱上立柱构件采取减隔震措施,可以忽略风撑体系对拱桥系统易损性的影响。

(4) 拱桥立柱体系和吊杆体系的易损性小于其对应单个构件的易损性,而桥墩体系和拱肋体系的易损性则要大于其对应单个构件的易损性,各体系易损性和对应构件易损性的变化率随着地面峰值加速度的增加而减小。

(5) 采用一阶界限法进行拱桥系统易损性分析时,假定拱桥各体系之间完全相关,会低估拱桥整体系统的易损性,而忽略拱桥各体系之间的相关性,则会高估拱桥整体系统的易损性。显然,采用基于 Copula 函数的拱桥串-并联体系进行系统易损性分析比较合理。

参考文献:

[1] 吴文朋.考虑不确定性的钢筋混凝土桥梁地震易损性研究[D].长沙:湖南大学,2016.

- with consideration of various sources of uncertainty [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [2] LIU Q, YANG C Y. Seismic damage probability assessment of isolated girder bridges based on performance under near-field earthquakes [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (20) : 9595. DOI:10.3390/APP11209595.
- [3] 李宏男, 成虎, 王东升. 桥梁结构地震易损性研究进展述评 [J]. 工程力学, 2018, 35 (9) : 1-16. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0280.
- LI Hongnan, CHENG Hu, WANG Dongsheng. A review of advances in seismic fragility research on bridge structures [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35 (9) : 1-16. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0280. (in Chinese)
- [4] MA M, WANG X G, LIU N D, et al. Nested copula model for overall seismic vulnerability analysis of multispan bridges [J]. Shock and Vibration, 2022, 2022 (1) : 3001933. DOI: 10.1155/2022/3001933.
- [5] 钟剑, 任伟新, 万华平, 等. 两水准地震设防下的斜拉桥体系易损性分析 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (12) : 101-109. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.12.011.
- ZHONG Jian, REN Weixin, WAN Huaping, et al. System fragility analysis for cable-stayed bridges under two level seismic hazard [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (12) : 101-109. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.12.011. (in Chinese)
- [6] 吴文朋, 李立峰. 桥梁结构系统地震易损性分析方法研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (21) : 273-280. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.21.039.
- WU Wenpeng, LI Lifeng. System seismic fragility analysis methods for bridge structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37 (21) : 273-280. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.21.039. (in Chinese)
- [7] 王志远, 赵人达, 吴鑫睿, 等. 大跨度钢管混凝土劲性骨架拱桥地震易损性分析 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (16) : 72-81. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.16.009.
- WANG Zhiyuan, ZHAO Renda, WU Xinrui, et al. Seismic vulnerability analysis of long-span CFST stiff-skeleton concrete arch bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42 (16) : 72-81. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.16.009. (in Chinese)
- [8] CHEN X. System fragility assessment of tall-pier bridges subjected to near-fault ground motions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25 (3) : 04019143. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001526.
- [9] CHEN L B, HUANG C G, CHEN H Q, et al. Seismic fragility models of a bridge system based on copula method [J]. Earthquake Spectra, 2022, 38 (2) : 1417-1437. DOI: 10.1177/87552930211052573.
- [10] KIM J S, PARK W S, HAN T S. Framework to evaluate seismic fragility of bridges considering component damage correlations [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2021, 15 (5) : 2150022. DOI: 10.1142/s1793431121500226.
- [11] GAO W, CAO Q, HE H X, et al. Seismic vulnerability analysis of continuous beam bridge based on multivariate copula function [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2437 (1) : 012080. DOI: 10.1088/1742-6596/2437/1/012080.
- [12] REN L P, ZHANG G, ZHANG Y F, et al. Seismic fragility analysis of V-shaped continuous girder bridges [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24 (3) : 835-846. DOI: 10.1007/s12205-020-0805-8.
- [13] 何浩祥, 程扬, 黄磊, 等. 基于多元 Copula 函数的连续梁桥整体地震易损性分析 [J]. 北京工业大学学报, 2022, 48 (10) : 1018-1027. DOI: 10.11936/bjutxb2021070018.
- HE Haoxiang, CHENG Yang, HUANG Lei, et al. Seismic fragility analysis of continuous beam bridge based on multivariate copula function [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48 (10) : 1018-1027. DOI: 10.11936/bjutxb2021070018. (in Chinese)
- [14] YAN J L, GUO A X. Comparison of damage indexes for assessing seismic fragility of bearings in an offshore bridge [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (13) : 7494. DOI: 10.3390/APP13137494.
- [15] SARRAF SHIRAZI R, PEKCAN G, ITANI A. Analytical fragility curves for a class of horizontally curved box-girder bridges [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22 (5) : 881-901. DOI: 10.1080/13632469.2016.1264325.
- [16] SONG S, QIAN Y J, LIU J, et al. Time-variant fragility analysis of the bridge system considering time-varying dependence among typical component seismic demands [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18 (2) : 363-377. DOI: 10.1007/s11803-019-0509-6.
- [17] 宋帅, 王帅, 吴刚, 等. 中小跨径梁桥地震易损性研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (9) : 118-125. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.09.016.
- SONG Shuai, WANG Shuai, WU Gang, et al. Seismic vulnerability analysis of small and medium span girder bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39 (9) : 118-125. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.09.016. (in Chinese)
- [18] 马天宇, 田石柱. 基于双折线模型更新的桥梁框架墩混合试验 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2020, 45 (1) : 17-24. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2020.0017.
- MA Tianyu, TIAN Shizhu. Hybrid testing of bridge frame pier structure based on bilinear model renewal [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45 (1) : 17-24. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2020.0017. (in Chinese)
- [19] 郑玲玲, 陈建伟, 李健强, 等. 圆钢管高强混凝土轴压短柱承载力有限元分析 [J]. 世界地震工程, 2016, 32 (3) : 171-178.
- ZHENG Lingling, CHEN Jianwei, LI Jianqiang, et al. Finite-element analysis of axial bearing capacity of circular steel tube with high strength concrete [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32 (3) : 171-178. (in Chinese)