

基于 Copula 函数的渡槽结构地震动易损性分析*

张建伟^{1,2,3}, 张 帅^{1,2,3}, 张翌娜⁴, 黄锦林⁵, 李兆恒⁵

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046) (2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心 郑州, 450046)
(3. 河南省水工结构安全工程技术研究中心 郑州, 450046) (4. 黄河水利职业技术学院土木与交通学院 开封, 475004)
(5. 广东省水利水电科学研究院 广州, 510635)

摘要 在结构易损性分析中, 由于构件之间的地震需求存在相关性, 直接建立渡槽系统中基本构件的联合概率分布函数较为困难, 为此引入二维 Copula 函数对构件地震需求之间的相关结构进行描述, 简化联合分布函数的建模过程。首先, 对某输水渡槽中的一跨进行时程分析, 以地面峰值加速度为自变量, 以排架的位移延性比和橡胶支座的变形大小为损伤指标, 考虑地震动和结构参数的不确定性, 建立排架、橡胶支座的易损性曲线; 其次, 通过 Copula 函数建立渡槽系统的易损性曲线; 最后, 通过 1 阶界限法得到渡槽系统易损性的上、下界。计算结果表明, 基于 Copula 函数计算得到的失效概率均位于 1 阶界限法的上、下界之间。研究结果有助于简化渡槽系统易损性曲线的建模过程, 为研究渡槽构件地震需求之间的相关性提供新思路和方法。

关键词 渡槽; 系统易损性; Copula 函数; 地震需求相关性; 联合概率分布函数

中图分类号 TV312

引 言

地震易损性是指在不同强度的地震作用下, 预测某一结构或构件超过某一损伤程度的条件概率, 是基于性能抗震设计的基础, 也是结构地震风险分析的主要组成部分^[1]。随着我国南水北调工程等水利工程的建设, 修建了一系列规模大、技术难度高的渡槽工程, 针对渡槽的地震易损性分析就显得尤为迫切。

关于地震易损性的研究方法一般有两种表达: 离散形式的易损性指标矩阵和连续形式的易损性曲线^[2]。易损性曲线受限条件少, 使用方便, 应用更加广泛。目前关于地震易损性的分析常以单一构件的易损性曲线来表达整个系统结构的损伤状态, 不考虑各构件之间的相互联系, 该方法虽简单, 但不能对整个系统的易损性进行准确评估。如果要准确考虑各构件的影响, 则需要充分了解结构构造细节以及各构件之间的相关关系, 建立各构件之间的联合分布函数模型。引起结构损伤的因素众多, 这些因素不仅本身机理复杂, 且各部分之间相互影响, 不同结

构都有自己所特有的细节, 直接建立系统的易损性曲线较为困难^[3]。Tavares 等^[4]采用 1 阶界限法, 不考虑构件损伤概率之间的相关性, 得到上界和下界来估计整个系统的易损性, 但界限范围较宽, 结果误差较大。Nielson 等^[5]通过 Monte Carlo 法得到整个系统结构的地震易损性曲线, 但其需要大量的数值抽样, 工作量较大, 操作麻烦, 且假设构件间的地震需求是线性的, 与实际非线性不相符。

近些年, 数学领域发展的 Copula 理论为不完备概率信息条件下相关变量的联合分布函数建立提供了一种新的途径^[6]。Copula 作为边缘分布函数的连接函数, 边缘分布函数的形式不会对其产生影响, 故 Copula 函数可以和边缘分布函数分开考虑, 能够有效解决构件需求之间的相关性^[7]。Copula 函数理论最先在金融领域中得到应用^[8], 在水文学^[9]以及结构工程^[10]中也得到了进一步的应用和发展。笔者基于 Copula 函数将构件地震需求间的相关性和构件的边缘分布函数分离, 建立橡胶支座和排架地震需求的联合分布模型, 在得到橡胶支座和排架的地震易损性曲线后, 通过 Copula 函数, 得到渡槽系统的易损性曲线, 并将其与 1 阶界限法结果比较,

* 国家自然科学基金资助项目(51679091); 河南省高校科技创新人才计划资助项目(18HASTIT012); 广东省水利科技创新资助项目(2017-16)

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2019-01-18

证明该方法的准确性和优越性。

1 基于 Copula 函数的联合分布函数构造方法

二维 Copula 函数定义为:在 $[0,1]^2$ 定义域内,边缘分布函数在 $[0,1]$ 内为均匀分布的二维联合分布函数,变量 X_1 和 X_2 的联合分布函数 $F(x_1, x_2)^{[11]}$ 可表示为

$$F(x_1, x_2) = C(F_1(x_1), F_2(x_2); \theta) = C(u_1, u_2; \theta) \quad (1)$$

其中: u_1, u_2 为 X_1, X_2 的边缘分布函数 $F_1(x_1), F_2(x_2)$; C 为 Copula 函数; θ 为 Copula 函数所对应的相关参数。

若 F_1, F_2 为连续函数,则 C 是唯一的。若 x_1, x_2 对应的边缘密度函数分别为 $f_1(x_1), f_2(x_2)$, 则 x_1, x_2 所对应的联合概率密度函数为

$$f(x_1, x_2) = f_1(x_1) f_2(x_2) c(F_1(x_1), F_2(x_2); \theta) \quad (2)$$

$$c(F_1(x_1), F_2(x_2); \theta) = \partial^2 C(u_1, u_2; \theta) / \partial u_1 \partial u_2 \quad (3)$$

其中: c 为 Copula 函数的密度函数。

若已知 X_1 和 X_2 的边缘分布函数以及 Copula 函数,则可以建立 X_1, X_2 的二维分布模型。Copula 函数的相关参数 θ 可以通过 Spearman 秩相关系数 τ 求出,变量 X_1, X_2 间的相关系数 τ 与 Copula 函数的 $C(u_1, u_2; \theta)$ 存在如下对应关系

$$\tau = 4 \int_0^1 \int_0^1 C(u_1, u_2; \theta) dC(u_1, u_2; \theta) - 1 \quad (4)$$

对于 Gaussian Copula 函数来说,相关参数 θ 可由下式解得

$$\tau = \frac{2}{\pi} \arcsin \theta \quad (5)$$

对于 Clayton 和 Cclayton Copula 函数,相关参数 θ 可由下式解得

$$\tau = \frac{\theta}{2 + \theta} \quad (6)$$

2 地震易损性曲线

2.1 构件易损性

渡槽是由排架以及橡胶支座等基本构件组成,基本构件的易损性是求解渡槽系统易损性的基础。在地震作用下,构件的易损性^[12]可以用构件的地震需求 S_d 超过构件的抗震能力 S_c 的概率来表示

$$P_f = P(S_d \geq S_c) \quad (7)$$

目前关于地震需求分析中,认为各构件的抗震能力和地震需求均服从对数正态分布,即构件的抗震能力 S_c 和地震需求 $S_d^{[13]}$ 可表示为

$$\begin{cases} S_c \sim \ln(\tilde{S}_c, \beta_c) \\ S_d \sim \ln(\tilde{S}_d, \beta_d) \end{cases} \quad (8)$$

其中: \tilde{S}_c, β_c 分别为构件抗震能力的均值和对数标准差; \tilde{S}_d, β_d 分别为构件地震需求均值和对数标准差。

由概率地震需求分析可知,构件地震需求 S_d 与地震动参数 IM 服从指数关系

$$S_d = a(\text{IM})^b \quad (9)$$

将式(9)转换为对数空间,得

$$\ln(S_d) = b \ln(\text{IM}) + \ln(a) \quad (10)$$

由中心极限定理可知,在某一极限状态下,构件纵向与横向的失效概率为

$$P_f = \Phi \left[\frac{-\ln(\tilde{S}_c / \tilde{S}_d)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (11)$$

将式(10)代入式(11),得构件纵向与横向的失效概率

$$P_f = \Phi \left[\frac{b \ln(\text{IM}) + \ln a - \ln \tilde{S}_c}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right] \quad (12)$$

单个构件纵向与横向的地震易损性曲线,其实现流程如图 1 所示。

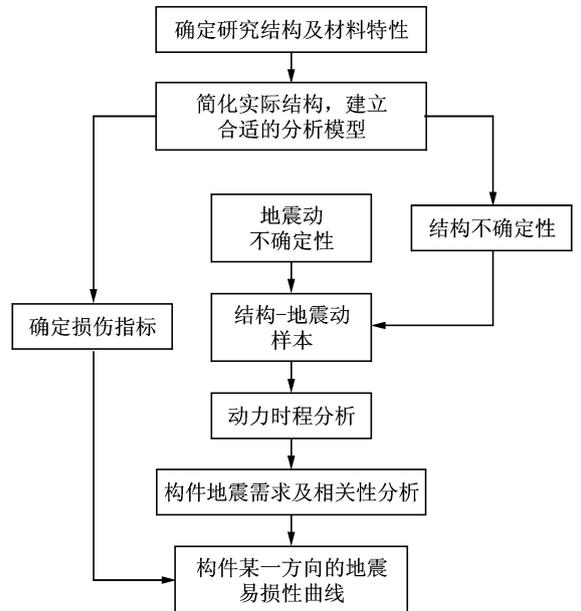


图 1 单个构件纵向与横向的地震易损性曲线实现流程
Fig. 1 Longitudinal and lateral seismic fragility curves of a single component

根据橡胶支座和排架的横向与纵向的失效概率,将两个方向地震作用效应进行耦合,可以得到橡

胶支座和排架的失效概率

$$\begin{cases} P_1 = P_{X_1} + P_{Y_1} - P_{X_1}P_{Y_1} \\ P_2 = P_{X_2} + P_{Y_2} - P_{X_2}P_{Y_2} \end{cases} \quad (13)$$

其中: P_1, P_2 分别为橡胶支座和排架的失效概率; P_{X_1}, P_{X_2} 分别为橡胶支座和排架的纵向失效概率; P_{Y_1}, P_{Y_2} 分别为橡胶支座和排架的横向失效概率。

将式(12)得到的结果代入式(13), 可得排架、橡胶支座的地震易损性曲线。

2.2 系统易损性及 Copula 函数的积分方法

渡槽在地震作用下, 排架和橡胶支座的损伤较为普遍, 且两者都会影响渡槽功能的发挥, 可将渡槽结构看作由排架和橡胶支座构成的串联系统, 故考虑构件相关性的渡槽系统失效概率为

$$\begin{aligned} P_{\beta} &= P(g_1 \leq 0 \cup g_2 \leq 0) = P(g_1 \leq 0) + \\ &P_2(g_2 \leq 0) - p(g_1 \leq 0, g_2 \leq 0) = \\ &P_{f_1} + P_{f_2} - C(P_{f_1}, P_{f_2}) \end{aligned} \quad (14)$$

其中: g_1 和 g_2 为橡胶支座和排架所对应的功能函数; P_{f_1}, P_{f_2} 为橡胶支座及排架所对应的失效概率。

将橡胶支座和排架的失效概率代入式(14), 得到整个渡槽系统的易损性曲线, 其中 Copula 函数是整个渡槽系统易损性求解的关键一步。数学中存在多种 Copula 函数可以描述变量间的相关性, 由似然函数亦池信息准则 (Akaike information criterion, 简称 AIC) 可知, Gaussian Copula 函数和 Frank Copula 函数能够较好地反映构件地震需求间的相关性, 故选择上述函数来计算渡槽系统的易损性。

Gaussian Copula 函数二维表达式为

$$C_N(u_1, u_2) = \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp \left[-\frac{s^2 - 2\theta st + t^2}{2(1-\theta^2)} \right] ds dt \quad (15)$$

Frank Copula 二维函数表达式为

$$C_F(u_1, u_2) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u_1} - 1)(e^{-\theta u_2} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right] \quad (16)$$

其中: $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为标准正态分布函数的逆函数。

3 计算实例

3.1 模型建立

以某工程总干渠 5# 渡槽中的一跨为例, 对渡槽进行易损性分析。该渡槽为钢筋混凝土 U 形薄壁结构, 两端采用盆式橡胶支座, 渡槽一跨长度为 12 m, 基础底端到槽顶高度为 16.5 m, 槽内设计水深 3.05 m, 排架横截面的尺寸为 1.1 m × 1.4 m。

渡槽槽身混凝土采用 C30, 密度为 2 484 kg/m³, 弹性模量为 3.11 × 10⁴ MPa, 泊松比为 0.167; 渡槽排架及基础混凝土采用 C20, 密度为 2 425 kg/m³, 弹性模量为 2.56 × 10⁴ MPa, 泊松比为 0.167; 钢筋密度为 7 800 kg/m³, 弹性模量为 20 × 10⁴ MPa; 盆式橡胶支座的密度为 2 500 kg/m³, 弹性模量为 0.386 × 10⁴ MPa, 泊松比为 0.35。算例模型采用 ANSYS 有限元软件建模, 渡槽槽身采用壳单元 SHELL63 模拟; 排架及基础采用实体单元 SOLID185 模拟; 橡胶支座采用弹簧单元模拟, 水平向采用 COMBIN40 单元, 垂直向采用 COMBIN14 单元; 渡槽顶梁及拉杆采用梁单元 BEAM188 模拟; 动水压力采用附加质量 MASS21 施加。渡槽有限元模型如图 2 所示, 计算工况为设计工况。

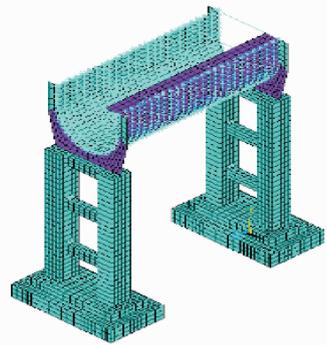


图 2 5# 渡槽有限元模型

Fig. 2 Finite element model of 5# aqueduct

3.2 模型不确定性

影响渡槽易损性分析的不确定性因素可分为结构参数不确定性和地震动不确定性, 在对渡槽进行易损性分析时, 必须考虑这些不确定性因素带来的影响。

结构参数不确定性是指由于知识缺乏或建模误差所导致的不确定性, 主要包括构件尺寸、材料、质量、阻尼和边界条件等。本渡槽模型考虑的结构参数不确定性与分布如表 1 所示, 根据结构参数的分布特征, 将每个参数的取值等概率分为 12 组, 去掉其中 1 组最大值和 1 组最小值, 保留 10 组, 然后通过拉丁超立方抽样法, 得到 10 个综合考虑结构参数不确定性的渡槽样本, 从而避免大量数值抽样。

挑选合适的地震动输入是地震易损性分析的基础。地震动不确定性主要包括地震动本身的随机性、方向效应、入射角和空间变异性。为了能够准确得到渡槽地震需求, 充分考虑地震动的随机性, 首先从太平洋地震工程中心强震数据库中选择 50 条地

震动记录,所选地震动的峰值加速度(peak ground acceleration,简称 PGA)分布如图 3 所示,然后将拉丁超立方抽样所得的 10 个渡槽模型和 50 条地震动记录进行随机匹配,进行地震时程分析计算。进行地震动力计算时,动弹模取值为 1.3 倍的静弹模,地基模拟采用局部人工边界无质量地基,并考虑三方向地震对结构影响,用 APDL 编程语言,从地基底部及四周输入地震波数据的峰值加速度进行等效应力输入。

表 1 结构参数不确定性及其分布

Tab.1 Uncertainties and their distribution of structure parameters

| 参数名称 | 分布类型 | 均值 | 变异系数 | 方差 |
|---|------|-------|------|----------------------|
| 排架混凝土容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 正态分布 | 24.75 | 0.10 | 6.12 |
| 槽身混凝土容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 正态分布 | 25.25 | 0.10 | 6.37 |
| 支座弹性模量 | 正态分布 | 3.86 | 0.16 | 0.38 |
| 阻尼比/MPa | 正态分布 | 0.05 | 0.01 | 2.5×10^{-7} |

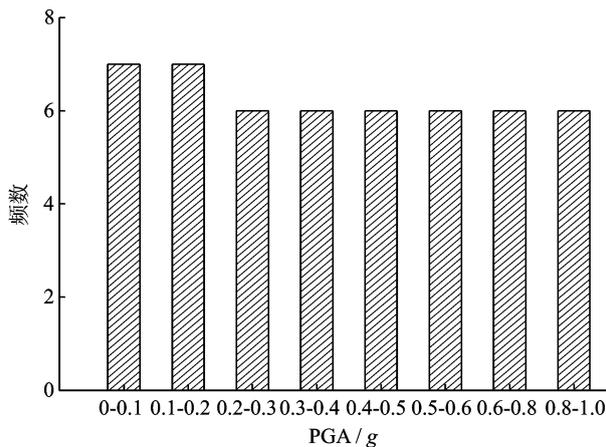


图 3 地震动的 PGA 分布

Fig. 3 PGA distributions of ground motion suites

3.3 构件地震需求

地震作用下,渡槽的橡胶支座和排架较易发生损伤。为有效地描述渡槽的损伤状态及损伤程度,以排架纵、横向位移延性比(μ_L, μ_T)以及橡胶支座纵、横向位移(b_L, b_T)作为构件的地震需求参数。

根据时程分析结果,通过最小二乘法对构件的地震需求和地震动参数进行回归分析,得到构件地震需求模型。排架纵向地震需求模型如图 4 所示,总结如表 2 所示。

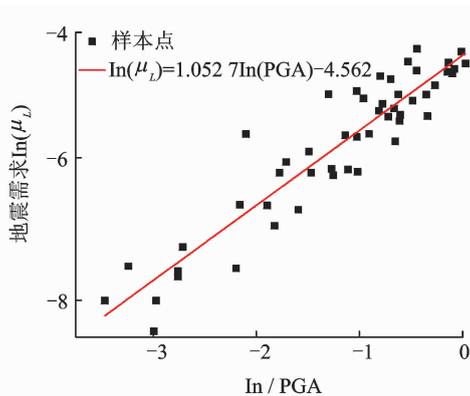


图 4 排架纵向地震需求模型

Fig. 4 Longitudinal seismic demand model of the column of bent

表 2 渡槽构件地震需求模型

Tab. 2 Seismic demand models of aqueduct components

| 构件需求参数 | 拟合函数 | 判定系数 | 对数标准差 |
|---------|---|---------|-------|
| μ_L | $\ln \mu_L = 1.053 \ln(\text{PGA}) - 4.562$ | 0.868 1 | 1.050 |
| μ_T | $\ln \mu_T = 1.088 \ln(\text{PGA}) - 5.364$ | 0.890 3 | 1.071 |
| b_L | $\ln b_L = 0.974 \ln(\text{PGA}) + 1.303$ | 0.881 5 | 0.964 |
| b_T | $\ln b_T = 0.998 \ln(\text{PGA}) + 1.769$ | 0.881 7 | 0.987 |

3.4 构件损伤指标

结构在地震作用下的损伤程度可分为 4 个等级:轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏^[14]。为了对各损伤状态下的易损性进行准确评估,需要定义各损伤状态下构件的损伤指标。

对于排架而言,各损伤状态下的位移延性比 μ_d ^[15]可表示为

$$\mu_d = \frac{\Delta}{\Delta_{\text{cyl}}} \tag{17}$$

其中: Δ 为墩顶极限位移; Δ_{cyl} 为纵向钢筋首次屈服时的墩顶位移。

排架在地震作用下的 4 种损伤程度的定性描述和损伤指标定量描述如表 3 所示。其中: μ_{cyl} 为单根

表 3 排架损伤状态及损伤指标描述

Tab. 3 Damage status and description of damage index of column of bent

| 损伤状态 | 损伤描述 | 损伤指标 |
|------|-------------------------|--|
| 轻微破坏 | 混凝土发生轻微剥落,有微小裂缝产生 | $\mu_{\text{cyl}} < \mu_d \leq \mu_{\text{cy}}$ |
| 中等破坏 | 混凝土发生开裂,裂缝不断扩展,结构抗力不断降低 | $\mu_{\text{cy}} < \mu_d \leq \mu_{\text{c1}}$ |
| 严重破坏 | 局部混凝土压碎,形成较大裂缝 | $\mu_{\text{c1}} < \mu_d \leq \mu_{\text{cmax}}$ |
| 完全破坏 | 核心混凝土压碎,发生倒塌 | $\mu_d > \mu_{\text{cmax}}$ |

钢筋首次屈服时位移延性比; μ_{cy} 为等效屈服位移延性比; μ_{c1} 为截面边缘钢筋混凝土压应变达到 0.004 时的位移延性比; μ_{emax} 为最大破坏位移延性比。

通过弯矩-曲率分析和 Pushover 方法可得到各损伤状态下排架的损伤指标, 结果如表 4 所示。

橡胶支座是渡槽结构中的一个重要构件, 同时也是较容易发生损伤的构件。支座的损伤状态与其

变形大小密切相关, 一般采用其变形大小作为损伤指标^[16]。本研究橡胶支座的 4 种损伤状态, 用其允许相对位移与剪应变为 100% 时的相对位移之比来定义, 4 种损伤状态的相对位移比分别为 1.0, 1.5, 2.0 和 2.5。由橡胶支座的物理参数与几何尺寸, 可得橡胶支座在 4 种损伤状态下的损伤指标, 如表 4 所示。其中: μ_L, μ_T 为排架纵、横向位移延性比; b_L, b_T 为橡胶支座纵、横向位移。

表 4 构件损伤指标

Tab. 4 Limit states of aqueduct components

| 需求参数 | 均值(轻微) | 均值(中等) | 对数标准差 | 均值(严重) | 均值(完全) | 对数标准差 |
|-----------------|--------|--------|-------|--|--------|-------|
| μ_L | 1.00 | 1.64 | 0.246 | 3.75 | 6.75 | 0.472 |
| μ_T | 1.00 | 1.56 | 0.246 | 3.31 | 6.31 | 0.472 |
| b_L/mm | 3.00 | 4.50 | 0.246 | 6.00 | 7.50 | 0.472 |
| b_T/mm | 3.00 | 4.50 | 0.246 | 6.00 </td <td>7.50</td> <td>0.472</td> | 7.50 | 0.472 |

由结构参数不确定性可知, 在不同损伤状态下, 结构的抗震能力也具有不确定性。参考 Nielson^[17] 提出的变异系数(V)来描述构件抗震能力的不确定性。对于前 2 种损伤状态变异系数取值为 0.25, 对于后 2 种损伤状态变异系数取值为 0.5。当构件的抗震能力服从对数正态分布时, 对数标准差和变异系数存在如下关系

$$\beta_c = \sqrt{\ln(1 + V^2)} \quad (18)$$

由式(18)便可求得橡胶支座、排架在各损伤状态下的抗震能力对数标准差, 如表 4 所示。

4 计算分析

4.1 构件易损性

将排架和橡胶支座的 地震需求模型和损伤指标代入式(12)、式(13), 可得排架和橡胶支座的易损性曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可知: 在地震动峰值加速度小于 0.1g 时, 排架、橡胶支座发生损伤的概率均较小; 橡胶支座在 4 种损伤状态下的失效概率明显大于排架; 橡胶支座与排架相比, 在 4 种损伤状态下的失效概率变化幅度较小。

4.2 渡槽系统易损性

4.2.1 Copula 函数方法

利用 Matlab 的 Copulafit 函数计算 Gassian

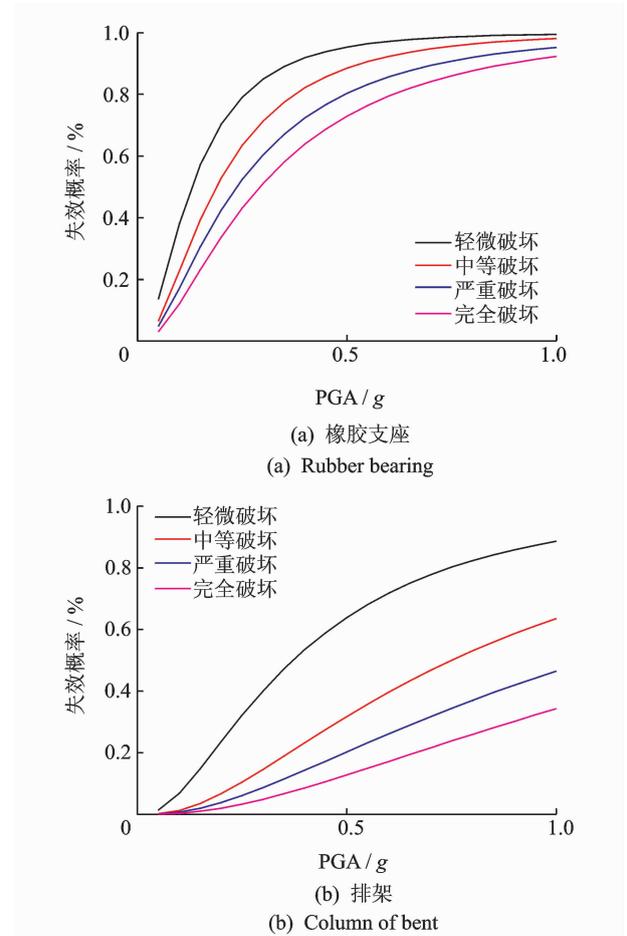


图 5 渡槽构件易损性曲线

Fig. 5 Fragility curves of aqueduct components

Copula 和 Frank Copula 函数中的相关参数, 绘制

Gaussian Copula 和 Frank Copula 的密度函数图和分布函数图。通过式(14)~(16)可得整个渡槽系统的易损性曲线。

4.2.2 1 阶界限法

为检验 Gaussian Copula 函数和 Frank Copula 函数的准确性,将其与 1 阶界限法结果进行比较。采取 1 阶界限法计算渡槽整体失效概率的上界与下界,来逼近整个系统的易损性。整个渡槽的失效概率^[18]可表达为

$$\max_{i=1}^n [P_i] \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i] \quad (19)$$

其中: P_f 为整个渡槽的失效概率; P_i 为第 i 个构件的失效概率; n 为构件个数。

假设结构系统的各种失效模式是正相关的,即相关系数 $\rho > 0$,则下界为单个构件易损性的最大值。为直观比较,将其与 Copula 函数得到的渡槽系统易损性曲线放在同一图中比较,如图 6 所示。

由图 6 可知,通过 Copula 函数得到的渡槽系统失效概率在整个地震动强度内都处于 1 阶界限法上界和下界之间,且更靠近于上界。用下界描述系统的易损性会明显降低整体结构的易损性。两种 Copula 函数结果对比可知,通过 Frank Copula 函数和 Gaussian Copula 函数计算得到的渡槽系统易损性结果接近,4 种破坏状态下的最大偏差分别为 3.1%,4.2%,5.1%和 4.6%。随着地震动强度的增大,通过 1 阶界限法所得到的上、下界的差值变的越来越大。因此,当地震动强度较大时,采用 1 阶界限法的下界来估计渡槽系统的易损性较为保守。

5 结论

1) Copula 函数不仅能准确地描述橡胶支座和排架的非线性相关特性,还能简化多元联合概率密度函数的建模过程,为研究渡槽构件地震需求之间的相关性提供了一种新的思路和方法。

2) 通过 Copula 函数得到的渡槽地震易损性曲线与 1 阶界限法相比较,发现其位于 1 阶界限法的上下界之间,表明渡槽系统的易损性大于单个构件的易损性。通过 1 阶界限法得到的系统易损性曲线,上下界最大偏差分别为 26.1%,27.0%,26.8%和 26.2%,上下界带宽较大。如果单纯采用构件易损性作为渡槽整体的易损性会导致较大误差。

3) 本研究采用的是二维 Copula 函数来描述渡槽排架和橡胶支座的易损性曲线。将二维 Copula 函数扩展为多维 Copula 函数,从而构造多元混合

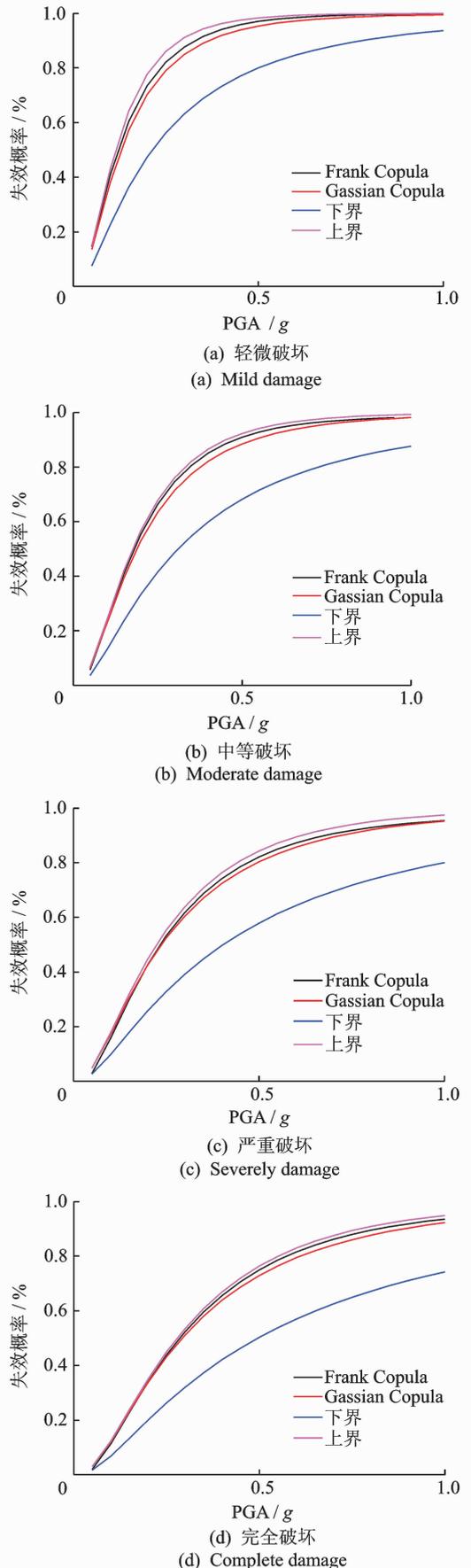


图 6 渡槽系统易损性曲线

Fig. 6 Fragility curves of aqueduct system

Copula 函数描述多个构件的相关性,以便对更复杂的系统进行相关性分析,需要进一步研究,可以尝试选用其他对随机变量之间尾部相关关系变化较为敏感的 Copula 函数。

参 考 文 献

- [1] Billah A M M M, Alam M S. Seismic fragility assessment of highway bridges: a state-of-the-art review[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11(6): 804-832.
- [2] Bostrom A, French S P, Gottlieb S J. Risk assessment, modeling and decision support: strategic decisions [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 5-82.
- [3] Taskari O, Sextos A. Multi-angle, multi-damage fragility curves for seismic assessment of bridges [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2015, 44(13): 2281-2301.
- [4] Tavares D H, Suescun J R, Paultre P, et al. Seismic fragility of a highway bridge in Quebec [J]. Journal of Bridge Engineering-ASCE, 2013, 18(11): 1131-1139.
- [5] Nielson B G, DesRoches R. Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(6): 823-839.
- [6] Li Dianming, Tang Xiaolong, Phoon K K, et al. Bivariate simulation using copula and its application to probabilistic pile settlement analysis [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(6): 597-617.
- [7] 唐小松,李典庆,周创兵,等.联合分布函数构造的 Copula 函数方法及结构可靠度分析[J].工程力学,2013,30(12):8-17,42.
Tang Xiaosong, Li Dianqing, Zhou Chuangbing, et al. Modeling bivariate distribution using copulas and its application to component reliability analysis[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 8-17, 42. (in Chinese)
- [8] Cherubini U, Luciano E, Vecchiato W. Copula methods in finance [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2004:49-93.
- [9] 范嘉炜,黄锦林.基于 Copula 函数的洪峰流量与洪水历时联合分布研究[J].中国农村水利水电,2017(2):204-209,214.
Fan Jiawei, Huang Jinlin. Combined frequency analysis of peak and duration based on copula function [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(2): 204-209,214. (in Chinese)
- [10] 王海军,练继建,王日宣.水电站厂房结构地震响应非线性分析[J].水电能源科学,2008(3):88-91.
Wang Haijun, Lian Jijian, Wang Rixuan. Seismic response nonlinear analysis of hydro powerhouse structure [J]. Water Resources and Power, 2008(3): 88-91. (in Chinese)
- [11] 李典庆,吴帅兵,周创兵,等.二维联合概率密度函数构造方法及结构并联系统可靠度分析[J].工程力学,2013,30(3):37-45.
Li Dianqing, Wu Shuaibing, Zhou Chuangbing, et al. Bivariate distribution construction method and its application to structural parallel system reliability analysis [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 37-45. (in Chinese)
- [12] Agrawal A K, Ghosn M, Alampalli S, et al. Seismic fragility of retrofitted multispan continuous steel bridges in New York [J]. Journal of Bridge Engineering-ASCE, 2012, 17(4): 562-575.
- [13] Zakeri B, Padgett J E, Amiri G G. Fragility assessment for seismically retrofitted skewed reinforced concrete box girder bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(2): 1-11.
- [14] Hazus-Mh M R I. Multi-hazard loss estimation methodology: earthquake model [M]. Washington D C: Department of Homeland Security, FEMA,2003:7-8.
- [15] 李宁,李杨,李忠献.基于向量 IM 的钢筋混凝土桥墩地震易损性分析[J].工程力学,2016,33(1):58-63,71.
Li Ning, Li Yang, Li Zhongxian. Seismic vulnerability analysis of reinforced concrete bridge piers based on vector-valued intensity measure [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 58-63, 71. (in Chinese)
- [16] Hwang H,刘晶波.地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J].土木工程学报,2004,37(6):47-51.
Hwang H, Liu Jingbo. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges [J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(6):47-51. (in Chinese)
- [17] Nielson B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology,2005.
- [18] 王海良,张铎,刘中宪.基于 IDA 钢管混凝土桁架连续曲线桥抗震易损性分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(1):39-48.
Wang Hailiang, Zhang Duo, Liu Zhongxian. Evaluation of seismic vulnerability of CFST and continuous curved bridge using IDA [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 39-48. (in Chinese)



第一作者简介:张建伟,男,1979年3月生,博士,教授。主要研究方向为水工结构耦联振动与安全。曾发表《Signal denoising method for vibration signal of flood discharge structure based on combined wavelet and EMD》(《Journal of Vibration and Control》2017, Vol. 23, No. 15)等论文。

E-mail: zjwccivil@126.com

