

地震和风共同作用下斜拉桥的三维易损性分析*

陈龙 常军[†] 刘晨光

(苏州科技大学 土木工程学院, 苏州 215011)

摘要 为了更加合理地评估多灾害影响下斜拉桥风险状况, 论文基于地震和风灾害并发这一高风险事件, 并同时考虑了索塔、支座和斜拉索三种构件, 进而将二维系统易损性扩展到三维, 对斜拉桥展开了三维系统地震—风易损性分析。在地震作用下, 主梁处于弹性阶段, 因此本文不考虑主梁的损伤。首先, 基于增量动力分析(IDA)方法, 逐步增加施加于结构数值模型上的地震动强度, 同时模型上施加不同的风荷载, 并进行时程分析。然后, 基于力学行为高度耦合及关联性较强选择索塔、支座、斜拉索这三个构件, 并选取合理的损伤指标计算得到各自的地震—风易损性曲线, 揭示三构件间地震—风的内在相关性。最后, 基于 Person 相关性确定三者的相关系数, 得到斜拉桥合理的三维系统地震—风多灾易损性曲线。结果表明三维系统易损性分析结果比二维易损性分析得到的构件的失效概率更合理, 三维系统易损性曲线为结构风险评估提供数据支撑。

关键词 斜拉桥, 构件多灾相关性, 三维系统多灾易损性分析, IDA 方法

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

Three-dimensional Vulnerability Analysis of Cable-stayed Bridges under the Combined Action of Earthquakes and Winds*

Chen Long Chang Jun[†] Liu Chenguang

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract To more reasonably assess the risk status of cable-stayed bridges under the impact of multiple hazards, this study focuses on the high-risk event of concurrent earthquake and wind hazards, while considering three types of components: pylons, bearings, and stay cables. On this basis, the two-dimensional system fragility analysis is extended to a three-dimensional system, and a three-dimensional system seismic-wind fragility analysis of cable-stayed bridges is conducted. Under earthquake action, the main girder remains in the elastic stage and is therefore not considered to be damaged in this study. First, based on the Incremental Dynamic Analysis (IDA) method, loads are applied to the structural numerical model incrementally from low intensity, and different wind loads are simultaneously imposed on the model for time-history analysis. Then, considering the strong mechanical coupling and correlation among components, the pylons, bearings, and stay cables are selected, and reasonable damage indices are adopted to calculate their respective seismic-wind fragility curves, revealing the inherent correlation of seismic-wind effects among the three components. Finally, Pearson correlation analysis is employed to

2025-08-15 收到第 1 稿, 2025-09-16 收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(52208189), 智能建造关键基础科研项目(SJC2023002), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_3338); National Natural Science Foundation of China(52208189), Key Basic Research Project on Intelligent Construction(SJC2023002), Research and Practice Innovation Plan for Graduate Students in Jiangsu Province (KYCX23_3338).

[†] 通信作者 E-mail: changjun21@126.com

quantify the correlations among the three components, and a three-dimensional system seismic-wind multi-hazard fragility curve of the cable-stayed bridge is obtained. The results show that the failure probability of components derived from the three-dimensional system fragility analysis is more accurate than that from the two-dimensional fragility analysis, and the three-dimensional system fragility curve provides data support for structural risk assessment.

Key words cable-stayed bridge, component multi-hazard correlation, three-dimensional system multi-hazard vulnerability analysis, IDA method

引言

桥梁是交通网络的重要组成部分,对于改善交通,促进经济有着至关重要的作用.斜拉桥因其跨越能力强而在山区、跨海工程中被广泛采用.研究表明,地壳运动期间产生的热能会致使气温梯度加大,因此中、强地震往往伴有强风,一旦这类“低概率高风险”事件发生,结构的损伤程度不仅仅是单一灾害作用下的简单累加,其破坏后果更为严重^[1].

Cornell等^[2]率先提出适用于结构抗震设计与评估的正式概率框架,该框架在钢框架结构中已实现成功应用,为后续结构易损性研究提供了重要理论支撑.在桥梁工程领域,学者们逐渐意识到:仅针对桥梁单个构件开展地震易损性分析存在明显局限性,唯有通过全桥层面的地震易损性分析,才能准确衡量桥梁整体抗震能力^[3].现有全桥易损性研究多以“桥梁为不同构件组成的串联系统”为前提,但实际工程中桥梁抗震性能往往难以满足“串联”假设的严苛要求,这一矛盾推动了桥梁系统易损性评估方法的创新.例如,王其昂等^[4]提出基于多地震需求参数分析的桥梁系统易损性评估方法,将统一维易损性概念拓展至多维层面;宋帅等^[5]为考虑桥墩、支座等构件地震需求间的相关性,引入多元 Copula 函数描述构件需求的相关结构,进而提出全桥易损性分析新方法;任文静等^[6]则通过相关性分析计算两构件相关系数,结合内在相关性得到合理的二维系统地震易损性曲线.然而,当前研究仍存在多方面局限:部分研究聚焦单一构件或单一灾害,如赵正豪^[7]虽开展了斜拉桥索塔的地震易损性与风灾易损性分析,并探究了地震-风共同作用下索塔的多灾易损性,但未从系统层面对斜拉桥整体多灾易损性进行评估;现有多构件相关研究多局限于两构件不同指标的相关性机制,尚未深入探究

多个构件间的关联规律^[6];多数研究未充分考虑多灾害这一高风险事件的影响,而斜拉桥本身结构复杂、构件众多且彼此作用相互促进,多灾叠加时更会显著放大结构响应^[7].综上,为更合理地评估桥梁系统易损性,后续研究需在兼顾桥梁系统中多构件、多灾害影响的基础上,进一步开展桥梁三维系统易损性研究,以弥补现有研究的不足.

本研究以一座斜拉桥为例,运用增量动力分析^[8](IDA)方法,对桥梁结构的动态响应过程进行数值仿真.通过系统分析,获取了索塔、支座及斜拉索构件在多种地震波与风荷载工况下的响应极值,同时选定了适用于该桥型的损伤量化指标,合理界定了不同性能水准对应的阈值参数,明确不同构件之间的相关系数,确定模型概率密度方程联合三维性能极限状态方程得到桥梁系统的三维地震-风易损性曲线.研究成果可以为斜拉桥多灾害风险评估提供参考依据.

1 多维易损性研究

1.1 多维易损性理论

地震易损性曲线是以地震动强度指标为横坐标,结构发生损伤的超越概率为纵坐标绘制的一条曲线,计算公式为

$$P_f = P(D \geq C | IM) \quad (1)$$

式中, P 为结构或构件的失效概率; D 表示结构或构件的地震响应; C 表示结构或构件抗震能力; IM 为地震动强度参数.

考虑多个地震需求参数时,易损性定义从一维扩展到多维,其数学表达式^[9-10]:

$$P_f = \left\{ \bigcup_{i=1}^n D_i \geq C_{lim} \right\} \quad (2)$$

多维地震易损性公式中包含多个地震需求参数 D_i ,该方程可考虑不同构件对结构系统易损性的

影响。

1.2 多维性能极限状态方程

在易损性评估工作中,不应将各性能极限状态视作彼此独立的存在,而需充分考量其内在关联性;同时,这些性能极限状态并非固定不变的确定值,而是随机变量^[9]。多维性能极限状态方程如式(3):

$$L(D_1, \dots, D_N) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i}{C_{i\lim}} \right)^{N_i} - 1 = 0 \quad (3)$$

该方程支持对不同响应参数极限状态的关联性进行分析,以此为基础建立结构整体极限状态方程。参数 N_i 承担着体现各性能极限状态相关性的功能,对于特定结构而言,其取值需通过概率分析与工程判断相结合的方式来确定。当 $L(D_1, \dots, D_N) > 0$ 时,定义为结构失效。二维、三维性能极限状态几何示意图如图 1。

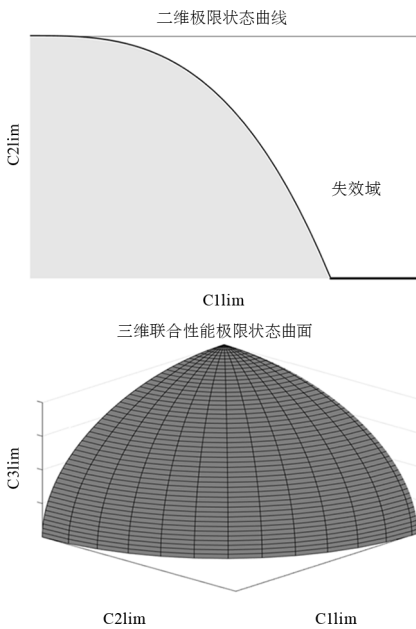


图 1 二维、三维极限状态图

Fig. 1 Two-dimensional, three-dimensional limit state diagram

根据任文静等^[6]对桥梁二维系统地震易损性的研究,文中在此基础上扩展到桥梁三维系统易损性研究。以 λ 、 μ 和 δ 作为各自的损伤指标,并根据韩建平等^[11]研究的多维性能极限状态方程,可得以下基本理论公式:

$$P_f = P \{ \lambda \geq \lambda_{\lim} \cup \mu \geq \mu_{\lim} \cup \delta \geq \delta_{\lim} \mid IM \} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\lim}} \right)^N + \left(\frac{\mu}{\mu_{\lim}} \right)^N + \left(\frac{\delta}{\delta_{\lim}} \right)^N - 1 = 0 \quad (5)$$

式中, N 值用来衡量索塔、支座和斜拉索在不同性能极限状态下的相关性,用 Pearson 相关性分析得到。 λ_{\lim} 、 μ_{\lim} 和 δ_{\lim} 分别为索塔、支座和斜拉索在极限性能极限状态下的峰值响应。

通过实际工程案例分析,验证了二维联合对数正态分布假定在地震响应分析中的合理性与有效性。在特定 PGA 的地震动作用下,构件的联合概率密度如下^[12]:

$$f(\lambda, \mu \mid IM) = \frac{\exp[-(\alpha^2 - 2\rho_{12}\alpha\beta + \beta^2)/2(1 - \rho_{12}^2)^2]}{2 \prod \lambda \mu \delta_1 \delta_2 \sqrt{1 - \rho_{12}^2}} \quad (6)$$

式中, $\alpha = [\ln(\lambda) - \theta_1]/\sigma_1$, $\beta = [\ln(\mu) - \theta_2]/\sigma_2$, θ_1 、 θ_2 分别为两构件结构响应均值, σ_1 、 σ_2 分别为两构件结构响应的对数标准差; ρ_{12} 为 $\ln(\lambda)$ 和 $\ln(\mu)$ 的相关系数。

通过非线性动力时程分析,得到桥梁构件最大结构响应数据。再将 3 个构件两两组合,斜拉索支座、斜拉索桥塔以及桥塔支座概率密度联立,最后联合三维性能极限状态方程得到三维系统易损性。

2 算例桥梁

2.1 桥梁简介

算例桥梁^[13]是双塔双索面半浮体钢箱梁斜拉桥,其跨度为 70 + 160 + 448 + 160 + 70 m,全长 908 m,如图 2 所示。本文采用 ANSYS 软件进行有限元建模,梁、桥墩和桥塔等主要结构组件均采用 BEAM189 单元进行精确模拟,斜拉索则采用 LINK10 单元进行建模,在塔梁连接处,横桥向采用固结处理,而顺桥向则通过 COMBIN40 单元模拟限位装置,如图 3 所示。桥塔由钢管和混凝土构成,管内填充 C50 混凝土,主墩采用 C40 混凝土,混凝土本构关系采用多折线模拟。采用 Q345 型钢,使用双线性随动强化模型(BKIN)的本构关系来模拟弹塑性问题。桥梁模型所采用的结构体系约束情况如表 1 所示,其中“1”表示约束或固结,而“0”表示放开约束。

为了确保所建立的有限元模型的准确性,本文通过对模型进行模态分析,获得模型的振型和固有频率,并将动力特性结果与文献[13]的相关数据进行对比,误差均保持在 5% 以内。

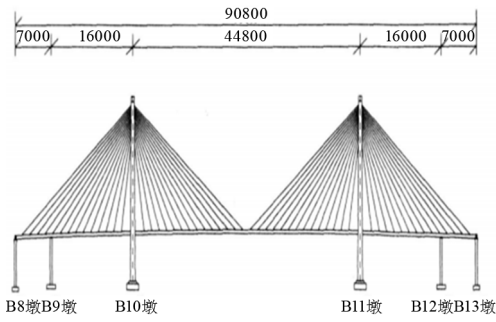


图 2 桥梁立面图
Fig. 2 Bridge elevation drawing

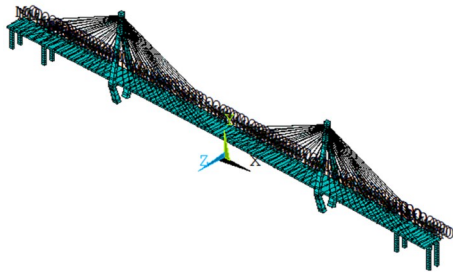


图 3 ANSYS 有限元模型
Fig. 3 ANSYS finite element model

表 1 斜拉桥有限元模型约束情况

Table 1 Constraint conditions of cable-stayed bridge finite element model

约束位置	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
桥塔、桥墩底	1	1	1	1	1	1
桥墩和主梁交接处	1	1	0	0	0	0
桥塔和主梁交接处	1	1	0	0	0	1

2.2 风灾害模拟

2.2.1 风速时程模拟

本文采用谐波叠加法进行脉动风场的模拟,该方法通过将不同频率的正弦和余弦函数叠加来模拟脉动风速的变化特征. 风速时程的模拟公式为

$$f_j(t) = \sqrt{2(\Delta\omega)} \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_{ml})| \cos[\omega_{ml}t - \theta_{jm}(\omega_{ml}) + \Phi_{ml}] \quad (7)$$

式中: N 为频率等分数; $\Delta\omega$ 为频率增量, $\Delta\omega = \omega_{up}/N$, ω_{up} 为截止圆频率,当 $\omega > \omega_{up}$ 时, $S^0(\omega) = 0$; Φ_{ml} 均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 内的随机相位; ω_{ml} 为双索引频率.

根据《公路桥梁设计规范》(JTG/T3360-01—2018)附表得到,该桥梁所处地区重现期 10 年、50 年、100 年的基本风速为 24.2 m/s、27.6 m/s、29.4 m/s. 作用工况分别命名为 F1、F2、F3,用来模拟桥梁遭受的风灾害. 后文 D 表示地震作用,F 表示风作用. 通过 Matlab 计算可以得到该点的实

际风速时程曲线. 本文仅列出部分风速模拟点的脉动风速时程曲线,如图 4 所示. 图 5 为脉动风速功率谱与目标谱对比图,通过比较可知,利用该方法得到的风功率谱和目标谱具有很好的一致性.

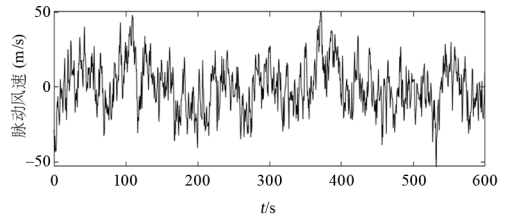


图 4 脉动风速时程曲线
Fig. 4 Fluctuating wind speed time history curve

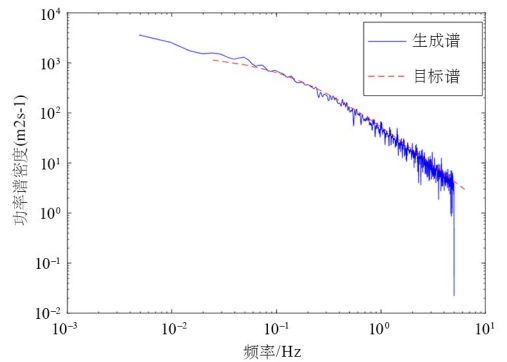


图 5 脉动风速功率谱与目标谱对比图
Fig. 5 Comparison chart between fluctuating wind speed power spectrum and target spectrum

2.2.2 风荷载计算

脉动风对桥梁结构的影响分为抖振风荷载和自激风荷载两部分,由于自激风荷载对结构的影响较小,本文仅考虑抖振风荷载的作用. 采用 Davenport 准定常抖振力模型模拟脉动风荷载,单位长度抖振风荷载的表达式为:

$$\begin{cases} L_b(t) = \frac{1}{2}\rho UB \{2C_L(\sigma_0)u(t) + [C'_L(\sigma_0) + \frac{A}{B}C_L(\sigma_0)]w(t)\} \\ D_b(t) = \frac{1}{2}\rho UB \left[2C_D(\sigma_0) \frac{A}{B}u(t) + C'_D(\sigma_0)w(t)\right] \\ M_b(t) = \frac{1}{2}\rho UB^2 [2C_M(\sigma_0)u(t) + C'_M(\sigma_0)w(t)] \end{cases} \quad (8)$$

式中: L_b 、 D_b 、 M_b 分别为抖振升力、阻力、扭矩; ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 ; U 为来流平均风速; $C'_L(\alpha_0)$ 、 $C'_D(\alpha_0)$ 、 $C'_M(\alpha_0)$ 分别为升力系数、阻力系数和扭的导数; $u(t)$ 为水平向脉动风速; $w(t)$ 为竖向脉动风速; A 为桥塔或桥墩的宽度, B 为主梁截面投影的宽度. 根据 JTG/T3360-01—2018,斜拉

桥的桥墩、索塔及拉索的风荷载及横桥向风作用下斜拉索的等效静风荷载为

$$F_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_D A_n \quad (9)$$

式中: U_g 为构件基准高度上的等效静阵风风速, C_D 为构件的阻力系数, A_n 为构件单位长度上顺风向的投影面积。

2.3 地震波选取

非线性的结构模型在具有相似地震动强度指标的不同地震波作用下的结构响应可能会截然不同^[14]。算例桥梁所在场地为Ⅲ类场地,特征周期为0.45 s,按Ⅶ度设防。为保证结构数值模拟的可靠性,本文以工程所在场地条件和特征周期为主要参考指标,从 PEER 数据库中选定了 10 条符合要求的实际地震动数据,如表 2 所示。本文所选择的地震动具有典型的代表性与较好的普适性。随后,对每条地震动记录在 0.1g~1.0g 范围内等步调幅处理,生成 100 条时程分析所需的地震动数据。这些地震动反应谱如图 6 所示。

表 2 地震动记录

Table 2 Earthquake ground motion record

序号	地震事件	测点名称	PGA/g
1	Northern Calif-03	Ferndale City Hall	0.05
2	San Fernando	LA-Hollywood Stor FF	0.10
3	Imperial Valley-06	Calipatria Fire Station	0.13
4	Loma Prieta	Agnews State Hospital	0.17
5	Landers	Joshua Tree	0.27
6	Hector Mine	Amboy	0.18
7	Darfield New Zealand	Styx Mill Transfer Station	0.18
8	Managua_Nicaragua-01	Managua_ESSO	0.37
9	Turkey	Turkey	0.58
10	Managua_Nicaragua-02	Managua_ESSO	0.26

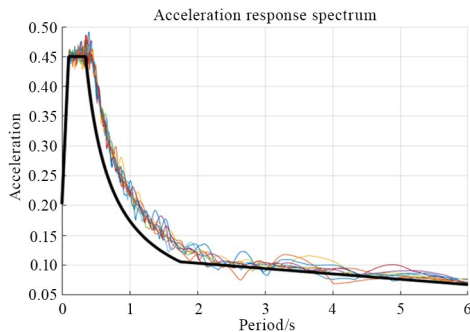


图 6 100 条地震波分布情况

Fig. 6 Distribution of 100 seismic waves

3 考虑构件相关性的桥梁三维系统地震—风易损性研究

3.1 一维地震易损性研究

3.1.1 损伤指标选取

在实际工程设计的过程中,桥塔的配筋率能够得到保证,桥塔的破坏形式为延性破坏,而支座往往出现剪切破坏,斜拉索通常选用钢绞线作为材料,其性质属于脆性材料,因此斜拉索的失效模式表现为脆性破坏特征。因此本文分别选择曲率延性比、位移和破坏极限拉应力作为各自的损伤指标^[15]。为了确定索塔不同损伤状态下位移延性比的阈值,采用 XTRACT 软件对索塔截面进行弯矩—曲率分析,得到各损伤状态对应的损伤指标^[16],如表 1 所示。基于滑动支座的纵向损伤状态进行了划分和描述^[17],依据《弹塑性防落梁球型钢支座》^[18],计算得出算例桥梁支座在 4 种性能极限状态下的位移阈值,如表 3 所示。吴少峰等^[19]对斜拉索 4 种破坏程度进行规定,完全损伤为超过拉索的名义极限抗拉强度, R_y^b 为极限抗拉强度,文中规定损伤指标如表 3。

表 3 各构件损伤指标

Table 3 Damage index of each component

构件	名称	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	完全损伤
索塔	曲率延性比	1.000	1.283	4.164	12.010
支座	位移	1.00	2.00	5.02	7.65
斜拉索	极限抗拉强度	0.4R _y ^b	0.6R _y ^b	0.8R _y ^b	1.0R _y ^b

3.1.2 桥梁各构件易损性曲线

对桥梁进行非线性增量动力分析(IDA),提取整理得到索塔的曲率延性比,索塔支座的峰值位移和斜拉索的抗拉强度,并整理得到各构件的对数均值和标准差。通过将索塔、支座及斜拉索对应的拟合回归方程依次代入公式(1),经代数运算与方程整理,推导出适用于上述构件在各性能极限状态下的失效概率计算表达式。结合 3.1.1 确定的损伤指标,得到不同强度的风与地震共同作用下的构件易损性曲线,如图 7 所示[以支座(a)、索塔(b)为例]。

3.1.3 桥梁结构易损性曲线

各构件易损性曲线虽能直观识别全桥危险位置与薄弱环节,但无法评估全桥抗震性能。为此,学者基于一阶可靠度理论,通过假定构件相互独立或完全相关^[20],得到整体桥梁不同性能极限状态下

失效概率的边界

$$\max [P(E_i)] \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(E_i)] \quad (10)$$

进而绘制出反映全桥抗震性能的易损性曲线,如图 8 所示.由图分析可知,随着 PGA 值与风速的逐步增大,构件及桥梁系统在各性能极限状态下下

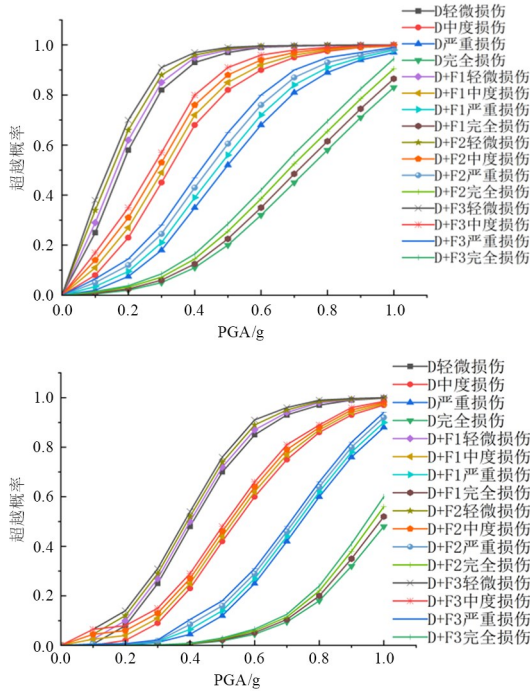


图 7 各构件的易损性曲线

Fig. 7 Vulnerability curve of each component

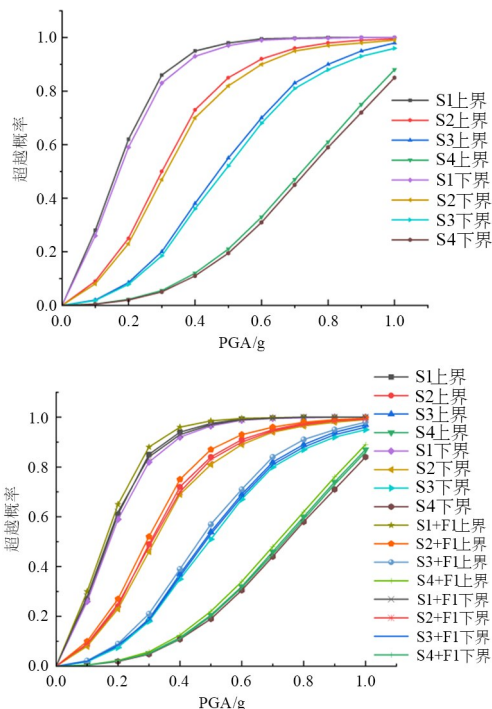


图 8 桥梁结构易损性界限

Fig. 8 Vulnerability boundaries of bridge structure

的失效概率均呈现上升趋势,但基于一阶可靠度理论的计算方法忽视了构件抗震能力的相关性,因此本文基于多维性能极限状态的易损性分析方法,进一步探究了考虑各构件地震需求与抗震能力相关性的桥梁结构地震失效概率.

3.2 不同构件地震相关性研究

本文数据符合线性相关,且 Pearson 相关系数的理论推导基于变量近似服从正态分布的假设.因此本文采用经典 Pearson 相关分析方法,针对索塔、支座及斜拉索在多种地震工况下的峰值响应数据,分别开展相关性研究分析,结果如表 4 所示.索塔支座相关性系数为 ρ_{12} ,索塔斜拉索相关性系数为 ρ_{13} ,支座斜拉索相关性系数为 ρ_{23} .进一步对所得系数进行拟合得到相关值 λ .因相关分析方法得出的 λ 值与 N 值所表征的相关性呈反向关系,故论文中将 N 值设定为 λ 值的倒数.考虑到本文中不同 PGA 作用下 λ 值波动幅度较小,因此对应各性能极限状态的 N 值均取平均数值 1.25.

3.3 桥梁结构三维系统易损性分析

文中充分考虑各构件结构响应之间的相关性,运用 Matlab 编程实现蒙特卡洛模拟方法,通过随机抽样技术生成了满足对数正态分布特征的样本数据集.针对不同性能极限状态下的方程,分别得到了不同 PGA 地震动和风作用下,桥梁结构考虑索塔,支座和斜拉索结构响应相关性的三维系统易损性曲线,将其与二维系统易损性曲线进行对比,如图 9 所示.

对比各三维和二维系统易损性曲线可知,计入三构件结构响应相关性的桥梁结构易损性曲线数值显著高于二维两构件模型的易损性曲线.这一结果表明,仅考虑两构件失效概率的分析方法会低估结构实际风险,导致对桥梁抗灾性能的误判,该结论与既有研究成果吻合.

在桥梁结构三维系统地震易损性曲线中,当失效概率达到 50% 时,在单一地震作用下, S1、S2、S3 性能极限状态对应的 PGA 值分别为 0.08 g、0.15 g、0.38 g.而在桥梁结构三维系统地震-风耦合作用的易损性曲线中,相同失效概率(50%)下, S1、S2、S3 性能极限状态对应的 PGA 值分别为 0.04 g、0.10 g、0.35 g.对比地震和地震风易损性曲线可

知,风荷载会增加构件的超越概率,且随风荷载的增加而增加.风作用对二维、三维系统易损性的影

响主要表现在轻微、中等损伤状态,严重、完全损伤的超越概率基本不变.

表4 不同地震作用下构件相关系数

Table 4 The correlation coefficients of components under different seismic actions

PGA/g	ρ_{12}	λ_{12}	N_{12}	ρ_{13}	λ_{13}	N_{13}	ρ_{23}	λ_{23}	N_{23}
0.1	0.867	0.845	1.183	0.863	0.841	1.189	0.866	0.842	1.188
0.2	0.852	0.832	1.202	0.796	0.835	1.198	0.821	0.837	1.195
0.3	0.756	0.796	1.256	0.789	0.810	1.235	0.816	0.783	1.277
0.4	0.831	0.791	1.264	0.814	0.801	1.248	0.823	0.786	1.272
0.5	0.836	0.782	1.279	0.841	0.784	1.276	0.796	0.812	1.232
0.6	0.843	0.796	1.256	0.834	0.815	1.227	0.798	0.782	1.279
0.7	0.823	0.801	1.248	0.831	0.798	1.253	0.824	0.784	1.276
0.8	0.861	0.825	1.212	0.759	0.782	1.279	0.832	0.793	1.261
0.9	0.852	0.789	1.267	0.831	0.799	1.252	0.821	0.801	1.248
1.0	0.837	0.793	1.261	0.814	0.791	1.264	0.833	0.814	1.228

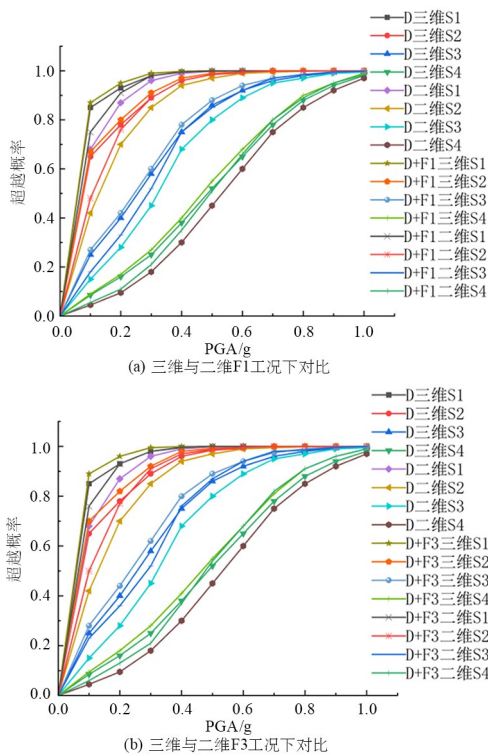


图9 桥梁结构三维易损性曲线

Fig. 9 Three-dimensional vulnerability curves of the cable-stayed bridge

4 结论

为剖析地震-风多灾害对斜拉桥的不利影响,建立斜拉桥有限元分析模型,选取各构件损伤指标,采用IDA方法分析桥梁地震响应规律.研究中叠加多风荷载工况,构建索塔、支座与斜拉索的易损性曲线,确定不同荷载组合下的构件相关系数,最终推导出反映桥梁综合性能的三维系统易损性

曲线,为桥梁风险评估提供依据.主要结论如下:

(1)由各构件的易损性曲线可知,支座的失效概率显著高于索塔和斜拉索的失效概率.这是因为在抗灾设计时支座往往设计为能力保护构件,以确保上部结构和索塔的抗灾安全性能.

(2)在地震和风共同作用下,二维及三维系统易损性分析的超越概率均大于地震单独作用,PGA相同时,风荷载会增加构件的超越概率,且随风荷载的增加而增加.风作用对二维、三维系统易损性的影响主要表现在轻微、中等损伤状态,而严重、完全损伤的超越概率则变化不大.

(3)基于索塔、支座和斜拉索结构响应相关系数,研究全面精准地获取了斜拉桥的三维系统易损性曲线;分析表明,综合考虑构件地震-风荷载相关性的三维系统易损性曲线数值显著高于基于二维构件组合或单个构件的易损性曲线结果.

参考文献

- [1] 李宏男,李钢,郑晓伟,等.工程结构在多灾害耦合作用下的研究进展[J].土木工程学报,2021,54(5):1-14.
LI H N, LI G, ZHENG X W, et al. Research progress in engineering structures subject to multiple hazards [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 1-14. (in Chinese)
- [2] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal e-

- mergency management agency steel moment frame guidelines [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(4): 526–533.
- [3] 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. WU W P, LI L F. System seismic fragility analysis methods for bridge structures [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(21): 273–280. (in Chinese)
- [4] 王其昂, 吴子燕, 贾兆平. 桥梁系统地震多维易损性分析 [J]. *工程力学*, 2013, 30(10): 192–198. WANG Q A, WU Z Y, JIA Z P. Multi-dimensional fragility analysis of bridge system under earthquake [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(10): 192–198. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 任文静, 邱大鹏, 张智, 等. 考虑构件地震相关性的近海桥梁二维地震易损性分析[J]. *震灾防御技术*, 2024, 19(1): 96–107. REN W J, QIU D P, ZHANG Z, et al. The two-dimensional seismic fragility analysis of the offshore bridge in considering the seismic correlation between different components [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2024, 19(1): 96–107. (in Chinese)
- [7] 赵正豪. 地震-风共同作用下斜拉桥索塔易损性分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2022. ZHAO Z H. Fragility analysis of tower of cable-stayed bridge under the interactions of earthquakes and winds [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022. (in Chinese)
- [8] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, 31(3): 491–514.
- [9] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M, et al. Multidimensional fragility of structures: formulation and evaluation; MCEER-06-0002 [R]. New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2006.
- [10] CASCIATI F, CIMELLARO G P, DOMANESCHI M. Seismic reliability of a cable-stayed bridge retrofitted with hysteretic devices [J]. *Computers & Structures*, 2008, 86(17/18): 1769–1781.
- [11] 韩建平, 周帅帅. 考虑非结构构件损伤的钢筋混凝土框架建筑多维地震易损性分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(1): 39–48. HAN J P, ZHOU S S. Multi-dimensional seismic fragility analysis of reinforced concrete framed building considering damage of non-structural components [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(1): 39–48. (in Chinese)
- [12] 刘骁骁, 吴子燕, 王其昂. 基于多维性能极限状态的概率地震需求分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(1): 181–187, 206. LIU X X, WU Z Y, WANG Q A. Probabilistic seismic demand analysis based on multi-dimensional performance limit states [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(1): 181–187, 206. (in Chinese)
- [13] 张茜. 大跨度斜拉桥风致抖振响应的非线性时程分析[D]. 西安: 长安大学, 2007. ZHANG X. The nonlinear time-domain analysis on wind-induced buffet of the long span cable-stayed bridge [D]. Xi'an: Changan University, 2007. (in Chinese)
- [14] 谢皓宇, 仇文岗, 牛松山, 等. 易损性分析考虑结构非线性的输入地震波选取方法研究[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(2): 80–86. XIE H Y, ZHANG W G, NIU S S, et al. Selection of input ground motions for seismic fragility analysis considering structural nonlinear response [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(2): 80–86. (in Chinese)
- [15] 魏莹莹. 地震-风作用下跨海公路斜拉桥多灾风险及抗倒塌鲁棒性分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2023. WEI Y Y. Analysis of multi-disaster risk and collapse resistance robustness of cable-stayed bridge on cross-sea highway under earthquake-wind [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023. (in Chinese)
- [16] PAN Y, AGRAWAL A K, GHOSN M, et al. Seismic fragility of multispan simply supported steel highway bridges in New York State. II: fragility analysis, fragility curves, and fragility surfaces [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(5): 462–472. [LinkOut]
- [17] 王学伟. 公铁两用斜拉桥地震作用下的破坏模式、地震易损性及风险评估[D]. 成都: 西南交通大学,

- 2017.
- WANG X W. Failure modes, seismic fragility and risk assessment of rail-cum-road cable-stayed bridge under earthquake excitation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 弹塑性防落梁球型钢支座: T/TMAC 007—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Elastic-plastic anti-fall beam spherical steel bearing: T/TMAC 007—2018 [S]. Beijing: China Standards Press, 2018. (in Chinese)
- [19] 吴少峰, 上官萍. 横桥向地面运动作用下独塔部分斜拉桥易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 142—149.
- WU S F, SHANGGUAN P. Seismic fragility analysis of partially cable-stayed bridge with single tower under cross-bridge ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2010, 30(2): 142—149. (in Chinese)
- [20] 郑凯锋, 陈力波, 庄卫林, 等. 基于概率性地震需求模型的桥梁易损性分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 165—171, 187.
- ZHENG K F, CHEN L B, ZHUANG W L, et al. Bridge vulnerability analysis based on probabilistic seismic demand models [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 165—171, 187. (in Chinese)