

大跨度钢桁拱桥地震需求参数敏感性分析

孙建鹏, 陈 彬, 徐伟超

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 大跨度钢桁拱桥常将桥面系与拱肋结合为整体, 充分发挥梁承受弯矩, 拱肋承受压力的结构特点, 愈加广泛地应用于我国桥梁建设中。以某大跨度中承式钢桁拱桥为工程背景, 运用一次二阶矩(FOSM)法、Tornado(龙卷风)图表法, 分析4种结构地震需求参数对于几种相关不确定因素的敏感度, 进而对相关不确定因素的重要性进行排序。分析结果表明: 结构的地震需求参数对地震动参数PGA最敏感, 其次为结构阻尼和混凝土相关参数, 而对其他不确定因素不太敏感, 这为同类结构随机地震反应分析以及概率地震需求分析提供了参考依据。

关键词: 大跨度钢桁拱桥; 地震需求参数; 敏感性分析; 桥梁抗震; 地震

中图分类号: U442.5*5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0308-07

Analysis on Seismic Demand Parameter Sensitivity of Long-span Steel Truss Arch Bridge

SUN Jianpeng, CHEN Bin, XU Weichao

(College of Civil Engineering, Xian University of Architecture and Technology, Xian 710055, China)

Abstract: The long-span steel truss arch bridge often combines the bridge deck system with the arch rib as a whole, and gives full play to the structural characteristics of the beam bearing the bending moment and the arch rib bearing the pressure, and is more and more widely used in the construction of bridges in China. Taking a long-span half-through steel truss arch bridge as the engineering background, the FOSM method and Tornado chart method are used to analyze the sensitivity of four structural seismic demand parameters to several related uncertain factors, and then the importance of related uncertain factors is sorted. The analysis results show that the seismic demand parameters of the structure are the most sensitive to the ground motion parameter PGA, followed by the related parameters of structural damping and concrete, and less sensitive to other uncertain factors, which provides a reference for the random seismic response analysis and probabilistic seismic demand analysis of similar structures.

Keywords: long-span steel truss arch bridge; seismic demand parameter; sensitivity analysis; anti-seismic bridge; earthquake

0 引 言

钢桁拱桥具有跨越能力大、承载能力高、外形壮观的特点, 目前国内已建成世界上最大跨度钢箱桁架推力拱桥——归长江公路大桥, 该桥全长883.2 m, 其中主桥为531.2 m中承式钢桁架拱桥^[1-3]。随着钢桁拱桥跨径的增大, 结构抗震性能也越来越受到重视。近年来, 不少学者对拱桥的抗震问题进行较深入研究, 并取得了一系列的成果。张令等^[4]以某三跨飞燕式钢管混凝土拱桥为研究背景, 研究并揭示近断层地震下大跨钢管混凝土拱桥的损伤模式; 李

子奇等^[5]研究了近断层脉冲型地震作用下速度脉冲参数对大跨度钢管混凝土拱桥地震反应的影响; 叶丹等^[6]研究了“V”形河谷场地效应对大跨上承式铁路钢管混凝土拱桥地震响应的影响, 并考虑地震入射角、行波速度及地震动峰值等因素对场地效应的影响; 乔新宇等^[7]采用时程分析法对其典型桥跨进行抗震性能分析, 得到了高墩联跨梁式桥的地震响应特性和发展规律; 贺国京等^[8]研究了大跨度钢管混凝土拱桥的空间地震响应; 张永亮等^[9-11]研究了在行波效应等作用下铁路大跨钢桁拱桥地震反应的影响规律、大跨上承式铁路钢桁拱桥空间地震响应及高阶振型对大跨度钢桁拱桥地震反应的影响; 庞林等^[12]分析了具有长周期、大脉冲及高竖向分量特性的近场地震动和地震行波效应对钢桁拱桥地震响应

收稿日期: 2024-12-16

作者简介: 孙建鹏(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事新型桥梁结构分析及抗震、工程结构防灾减灾研究工作。

的影响规律;杨灿等^[13]研究了大跨度中承式钢箱桁架拱桥合理抗震体系,分析桥梁自振特性、非线性时程地震响应,对比采用拉索减震支座前、后 2 种抗震支承体系下的桥梁地震响应,并对拉索减震支座的自由程进行参数分析。

一些研究者从地震灾害造成的损失出发,对一些抗震工程领域主要的不确定因素进行了敏感性分析^[14-16]。Pan 等^[17]分析了 5 种不确定性参数对桥墩地震响应的影响,指出上部结构重量和支座摩擦因数的影响较大。Tubaldi 等^[18]研究了 23 种不确定性在 PSDA 中的传递效果,指出结构建模相关不确定性的影响不可忽略。在抗震工程领域存在着许多基本的不确定性因素,如地震强度、结构几何参数、材料强度等。基于性能的抗震工程以概率可靠度为基础,那么理论上应该将所有的基本不确定性因素都视为随机变量,然而受目前的知识水平和分析计算能力的限制,考虑所有基本因素的不确定性是不现实的。敏感性分析的任务就是从众多的基本不确定性因素当中,筛选出对某一结构性能参数(如位移需求、能量需求、经济损失等)的不确定性影响最显著的因素,即敏感性因素。一旦敏感性因素得以确定,在结构的随机地震反应分析以及概率地震需求分析当中,即可忽略非敏感因素的不确定性,这将极大地提高分析的效率,而不会严重影响到分析的精度。

综合现有研究的局限性,本文以明珠湾大桥为工程背景,运用一次二阶矩(FOSM)法、Tornado(龙卷风)图表法,分析 4 种结构地震需求参数对于几种相关不确定因素的敏感度,进而对相关不确定因素进行重要性排序。

1 敏感性分析方法

1.1 一次二阶矩(FOSM)法

一次二阶矩(FOSM)法在结构可靠度理论中具有重要地位,是国际标准《结构可靠性总原则》(ISO2394)^[19]以及我国《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2018)^[20]中推荐采用的方法。本文运用均值一次二阶矩(MVFOSM)法进行敏感性分析。其理论分析如下:

设随机变量 Y 和基本随机向量 X 之间有非线性函数关系: $Y=g(X)$, MVFOSM 的基本思想是将 Y 在 X 的均值 M 处按 Taylor 级数展开可得:

$$Y = g(X) \approx g(M) + \nabla_M g^T (X - M) \quad (1)$$

式中: $M = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T$ 为随机向量 X 的平均值向量; $\nabla g = [\partial g / \partial X_1, \partial g / \partial X_2, \dots, \partial g / \partial X_n]^T$ 为函数关于向量 X 的梯度列向量; $\nabla_M g$ 为函数关于向量 X 的梯度矩阵在其均值 M 处的值。

于是可得随机变量 Y 的均值和方差:

$$\mu_Y \approx g(M) \quad (2)$$

$$\sigma_Y^2 \approx \nabla_M g^T \cdot V_c(X) \cdot \nabla_M g \quad (3)$$

式中: $V_c(X)$ 为随机向量 X 的协方差矩阵。

对敏感性进行分析时,由于式(3)能够反映输入参数 X 的不确定性通过函数 $\mu_Y \approx g(M)g(x)$ 进行传递,从而导致输出结果 Y 也出现不确定性的过程。在敏感性分析中往往将 σ_Y 作为反映 Y 对于 X 的敏感度的参量,若 σ_Y 很大,则表明 Y 对 X 很敏感;反之,则表明 Y 对 X 不敏感。

在实际应用中,往往希望能够分别确定地震需求参数对每一个随机变量 X_i 的敏感度,从而通过排序识别出主要的敏感性因素。若 X_i 之间交叉影响及相关性不大,可以忽略 X_i 之间交叉影响及其相关性,这样做可以很大程度上简化分析计算过程且得到的结果精度满足要求。因此,把除 X_i 以外所有随机向量都设置称为均值,将输出变量 Y 表示为:

$$Y = g(X) = (\mu_{X_1}, \dots, X_i, \dots, \mu_{X_n}) \quad (4)$$

将式按照 Taylor 级数展开,经过推导可以得:

$$\mu_Y \approx g(M) \quad (5)$$

$$\sigma_Y^2 \approx [\partial g(\mu_X) / \partial X_i]^2 \sigma_{X_i}^2 \quad (6)$$

式中: μ_Y 、 σ_Y^2 分别为随机变量 Y 的均值和方差。

本文研究运用有限元方法得到输入、输出参数间的函数关系 $g(x)$, $g(x)$ 关于随机变量 X_i 的梯度采用中心差分确定,即:

$$\frac{\partial g(M)}{\partial X_i} = \frac{g\{M + [0, \dots, \Delta X_i, \dots, 0]^T\} - g\{M - [0, \dots, \Delta X_i, \dots, 0]^T\}}{2\Delta X_i}$$

式中: ΔX_i 为第 i 个输入随机变量 X_i 的扰动量,本文将 ΔX_i 取为标准差 σ_{X_i} 的某个分位数,即: $\Delta X_i = D\sigma_{X_i}$ (D 为扰动系数,可以通过手性试验确定)。

1.2 Tornado(龙卷风)图形法

Tornado(龙卷风)图形法最早应用于决策分析领域,近年来有些学者利用该方法对建筑物的地震损失进行了敏感性分析^[21]。Tornado(龙卷风)图形由一系列被称为“幅摆”的水平横杠组成,每一条“幅摆”对应于一个不确定性输入变量,“幅摆”的宽度体

现了输出变量变异性。因此,若某个输入变量对输出结果的变异性产生了显著影响,其“幅摆”也就较宽,反之则较窄。确定了各输入变量对应的“幅摆”之后,将其按由宽至窄的顺序至上而下重新排列即

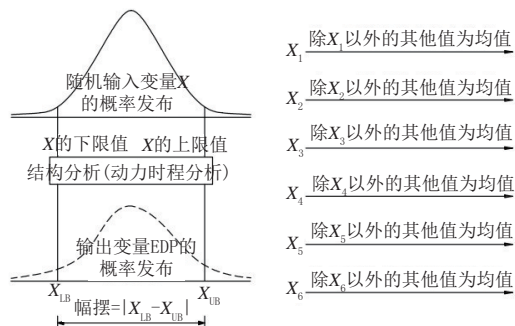


图1 Tornado(龙卷风)图形法

(1)首先选取结构的EDP(地震需求参数),如:墩底弯矩、墩底剪力等。

(2)任选一个随机输入变量 X ,根据输入变量概率分布的上、下限(本文取90%、10%)确定其对应的上限值和下限值。当输入变量不能使用概率函数来描述,则采用其他方法确定其上、下限值。

(3)将除随机变量以外的其它随机变量设置为均值,并将对应的上限值和下限输入到模型中进行结构动力时程分析,进而得到EDP的上限值 X_{UB} 和下限值 X_{LB} 。

(4)取 $|X_{UB} - X_{LB}|$ 为随机变量 X 对应的“幅摆”宽度,将其表示在初始图形中。

(5)重复上述步骤直至获得所有输入变量对应的“幅摆”宽度为止,将其自上而下按降序重新排序。排序后的图形即为Tornado图,图中的“幅摆”宽度反映了EDP对所选随机输入变量的敏感性。

2 工程概况

广州明珠湾大桥主桥为六跨连续三主桁双层桥面中承式钢桁拱桥,跨径布置为(96+164+436+164+96+60)m,主桥桥面宽43.2 m,边跨及主拱肋均为N形桁式结构,拱肋下弦线形采用二次抛物线,拱肋上弦部分采用二次抛物线。拱顶处拱肋上、下弦高11 m,钢桁梁边桁桁高10.369 m,中桁桁高10.685 m,中间支点处桁高52.52 m(其中拱肋加劲弦高23.166 m)^[22]。明珠湾大桥效果图及主桥结构简图见图2。

3 有限元模型

采用有限元软件建立全桥空间模型,其中主桁架、墩、桩基等用梁单元模拟,吊杆用索单元模拟,支

可得到最终的图形(见图1)。由于该图形和龙卷风形态相似,学术界将其命名为Tornado(龙卷风)图形。以下给出本章利用Tornado(龙卷风)图形法进行敏感性分析的具体步骤。

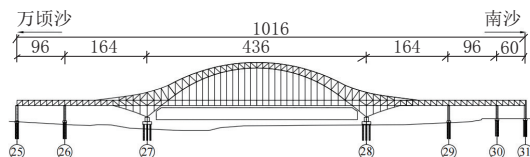
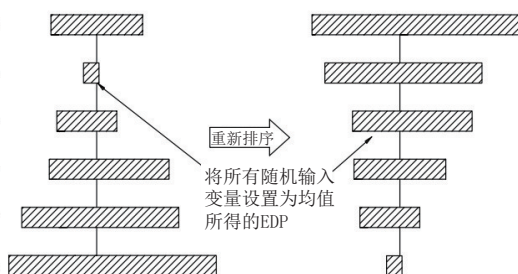


图2 明珠湾大桥立面图(单位:m)

承连接条件一般用合理的线性或非线形连接单元模拟。本章通过弹性连接模拟普通球型钢支座,建立上下节点模拟支座两端,上下节点分别与相应位置的主梁节点和墩顶节点刚接。桩基通过在桩基础相应位置处设置纵、横桥向土弹簧的方法,来考虑桩土相互作用的影响,模型中仅考虑土弹簧刚度,忽略阻尼和质量特性的影响,弹簧刚度根据土层的 m 值进行计算,分别设置纵向、横向土弹簧。有限元模型见图3。



图3 明珠湾大桥有限元模型

4 桥梁相关不确定因素

影响桥梁结构地震需求分析的不确定性可分为认知不确定性和偶然不确定性,其中,认知不确定性是由于人类当前掌握的知识或信息不够充分导致的,而偶然不确定性是事物自身固有的属性,在实际工程中二者的区别并不明显。例如,混凝土本构参数的不确定性是材料的固有属性,但结构自重、支座参数是由于缺乏足够的信息所致。本文主要从结构层次、材料层次和地震动的不确定性3个方面进行展开^[23]。

结构层次的不确定性主要影响结构整体的动力特性和响应。从结构动力学的角度来讲,与质量矩阵、刚度矩阵以及阻尼矩阵相关的不确定性都可归于这一类。材料层次的不确定性主要影响桥墩在地震作用下的非线性响应。地震动的不确定性主要来源于地震动的强度和特征。所谓地震动的强度是指结构在设计基准期内(如 50 a)可能遭受的地面运动激烈程度;而地震动的特征是指地震记录除强度以外的全部其它特性,如频谱、持时等。大量文献^[24-26]的研究结果表明:不确定性对构件响应均值和标准差的影响不完全相同;结构层面相关不确定性和地震动不确定性对所有的地震需求参数都有较大影响,与结构层面和地震动引起的不确定性相比,材料层面的不确定性对桥梁的影响相对较小。本文主要考虑混凝土容重、钢材容重、混凝土弹性模量、钢材弹性模量、阻尼比和地震动的不确定性。不确定性因素的概率分布类型及统计参数见表 1。

5 地震需求参数敏感性分析

选择 4 种能体现桥梁结构抗震性能的地震需求参数(EDP)进行敏感性分析,即分析结构的墩底弯

表 1 不确定性因素的概率分布类型及统计参数

不确定因素	分布类型	标准差	均值	变异系数
地震动参数 PGA(g)	极值Ⅱ型 ^[27-28]	0.64	0.286	2.25
混凝土弹性模量/ MPa	正态 ^[29-30]	3176	39 700	0.08
钢材弹性模量/ MPa	正态 ^[31]	17 760	222 000	0.08
混凝土容重/ (kg·m ⁻³)	正态 ^[32-33]	2.65	26.5	0.1
钢材容重/ (kg·m ⁻³)	正态 ^[32-33]	8.08	80.83	0.1
阻尼比	正态 ^[34]	0.02	0.05	0.4

矩需求、墩底剪力需求、拱脚竖向位移需求和拱顶位移需求。上述参数中,前 2 种属于地震内力响应,而后 2 种则属于地震位移响应。

5.1 一次二阶矩(FOSM)法分析结果

为确保 $\Delta X_i = D\sigma_{X_i}$ 中的扰动系数 D 取值合理,取 D 分别为 0.3、0.2 和 0.1 进行分析。经对比分析可知:当 D 为 0.1 时,可确保一次二阶矩(FOSM)方法的计算结果收敛。 D 为 0.1 时,EDP 的具体分析结果见图 4、图 5。

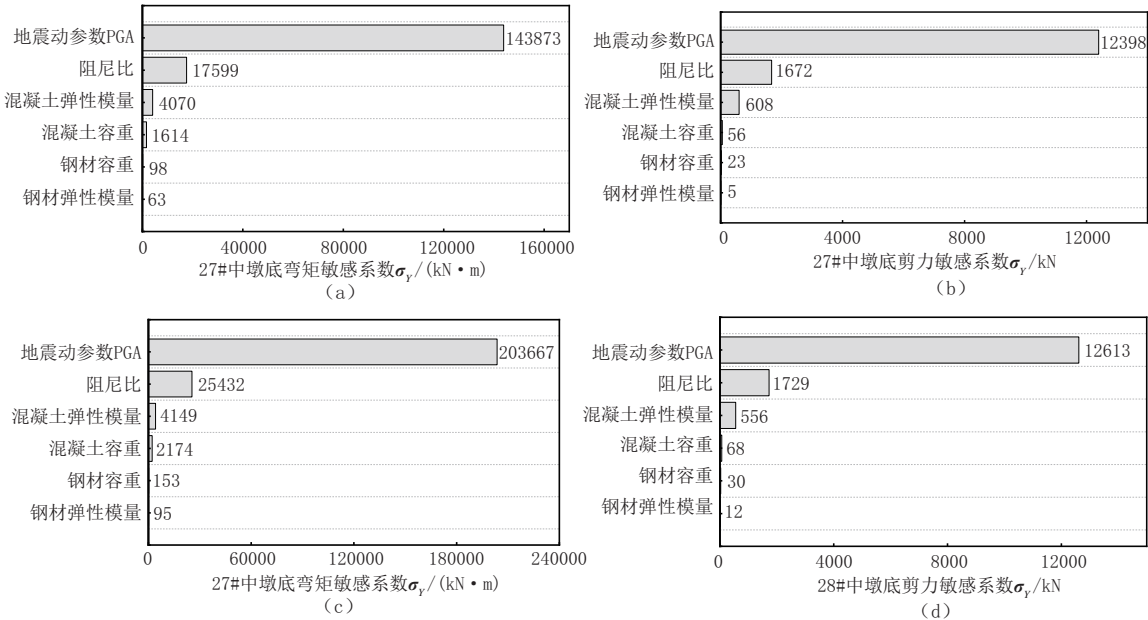


图 4 地震作用内力敏感系数图

由地震作用内力敏感系数条形图 4 和地震作用位移敏感系数图 5 可知:(1)在研究选取的诸多随机变量中,地震动参数 PGA 对背景桥地震响应的影响始终是排在第一位,这是因为地震的随机性远大于结构本身特性的随机性;(2)在对地震作用下背景桥的墩底内力响应分析上,地震动参数 PGA 的影响始

终排在第一位;钢材弹性模量和容重的影响排在第五、第六位,说明钢材弹性模量和容重对背景桥的墩底内力响应敏感性较小;(3)在对地震作用下背景桥关键部位的位移响应分析上,地震动参数 PGA 始终排在第一位。阻尼比的影响仅次于地震动参数 PGA,除了地震动参数 PGA 的影响外,阻尼比对背景

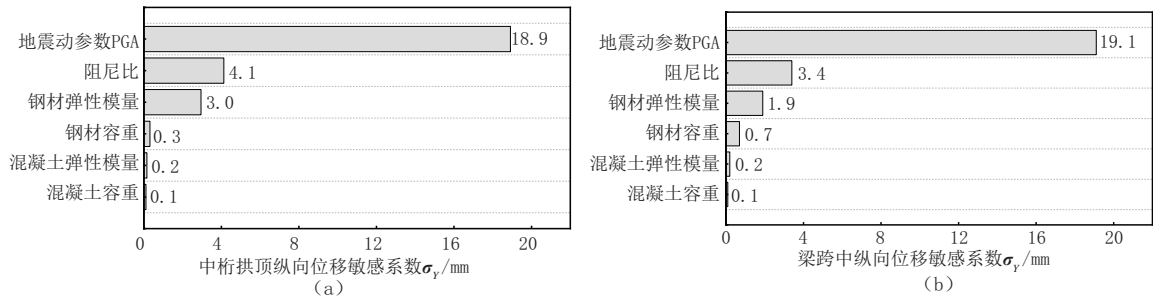


图5 地震作用位移敏感系数图

桥地震作用下关键部位的位移响应影响较大,混凝土弹性模量等材料特性对背景桥地震作用下关键部位的位移响应的影响较弱。

5.2 Tornado(龙卷风)图形法分析结果

采用敏感性分析方法研究桥梁建模相关参数的不确定性对桥梁抗震性能的影响,以预测各参数在地震需求分析中的重要性。该方法实际上是基于单一变量法,即每次分析中只改变单个参数的取值,而其他参数均保持中值不变。因此,首先根据各参数的分布特征,确定6个不确定性参数的上界、下界以及中值,分别对应10%,90%和50%的概率分位数,见表2。

表2 不确定性随机变量的取值				
不确定因素	分布类型	下限值	均值	上限值
地震动参数 PGA/g	极值Ⅱ型	0.117	0.286	0.462
混凝土弹性模量/MPa	正态	35 630	39 700	43 770
钢材弹性模量/MPa	正态	199 240	222 000	244 760
混凝土容重/(kg·m ⁻³)	正态	23.10	26.5	29.90
钢材容重/(kg·m ⁻³)	正态	70.47	80.83	91.19
阻尼比	正态	0.024	0.05	0.076

对不同地震需求参数(EDP)进行敏感性分析的结果,水平条带(幅摆)的宽度体现了地震需求对于相应不确定因素的敏感性。

图6和图7列出了采用Tornado(龙卷风)图形法

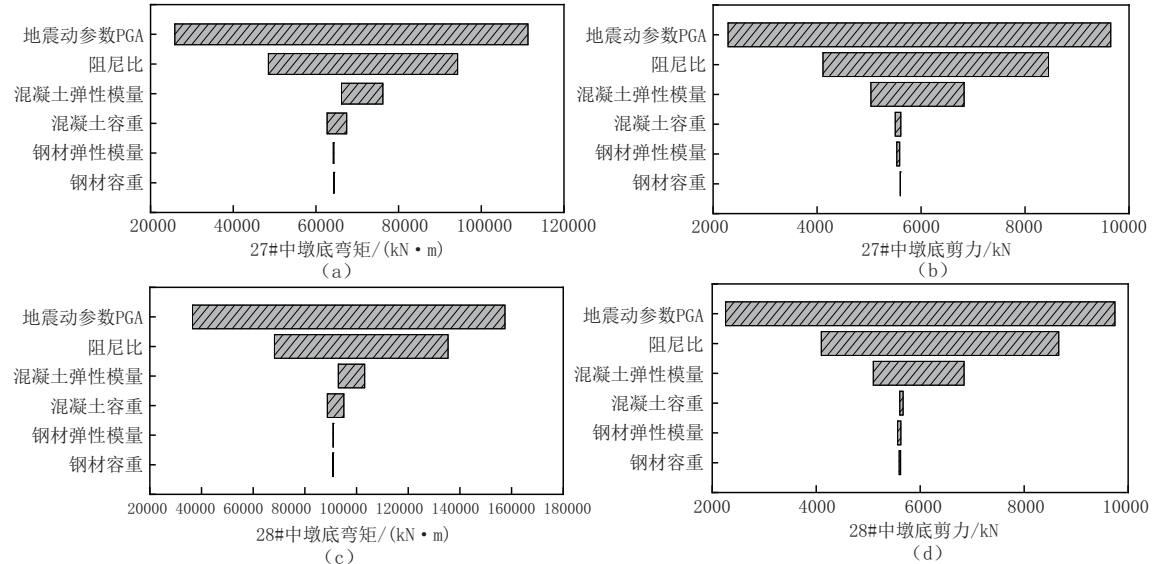


图6 地震作用内力Tornado图

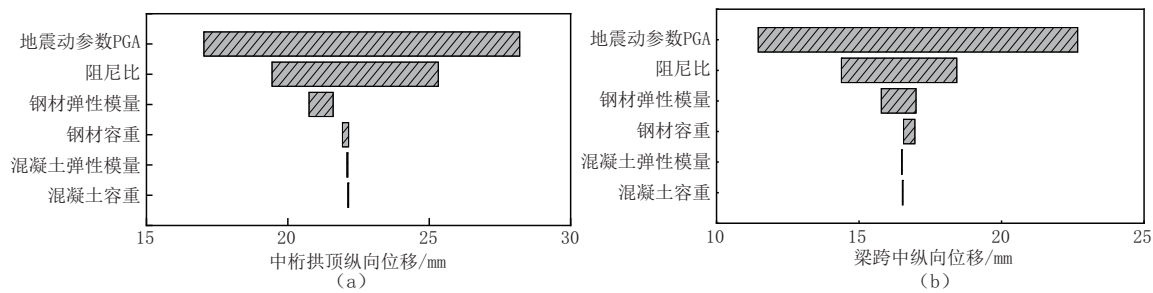


图7 地震位移位移Tornado图

由地震作用内力 Tornado 图 6 和地震作用位移 Tornado 图 7 可知:(1)在对墩底弯矩和剪力的影响因素里面,地震动参数、阻尼比总是排在前两位以内,其中混凝土弹性模量和混凝土容重对墩底弯矩和内力的敏感性较大,即混凝土强度等级的选择对墩底内力的影响很大,结合工程需要选用合适强度等级的混凝土可以有效减小背景桥在地震作用下的墩底内力值;(2)钢材弹性模量和容重对内力敏感性基本排在后面,说明了钢材弹性模量和容重对地震作用下背景桥的内力影响较小,即这两者不是地震作用下影响内力的主要因素;(3)地震动参数、阻尼比对拱顶纵向位移、梁跨中纵向位移的影响均排在前面。在地震作用下,地震动参数 PGA 对背景桥的位移响应有着明显的影响,说明地震动参数在桥梁位移敏感性分析里较为敏感。

5.3 敏感性分析结果的比较

本文主要采用一次二阶矩(FOSM)法和 Tornado (龙卷风)图形法进行敏感性分析,这两种方法各有优势和局限性。一次二阶矩(FOSM)法能估计出 EDP 的 2 个统计量(均值和标准差),但该方法仅对于线性的输入输出关系才能严格成立。Tornado(龙卷风)图形法计算简便,并且对于线性和非线性的输入输出关系均适用,但该方法无法提供有关地震需求参数的统计信息。

为了更好地比较这 2 种方法的分析结果,将 2 种方法得到的分析结果进行敏感性排序(见表 3)。

表 3 不确定性因素敏感性排序

不确定因素	中墩底弯矩		中墩底剪力		中桁拱顶纵向位移	梁跨中纵向位移
	27#	28#	27#	28#		
地震动参数 PGA/g	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
混凝土弹性模量/MPa	3-3	3-3	5-5	6-6	5-5	5-5
钢材弹性模量/MPa	6-5	6-5	4-4	5-4	3-3	3-3
混凝土容重/(kg·m ⁻³)	4-4	4-4	3-3	3-3	6-6	6-6
钢材容重/(kg·m ⁻³)	5-6	5-6	6-6	4-5	4-4	4-4
阻尼比	2-2	2-2	2-2	2-2	2-2	2-2

注:第 1 项为一次二阶矩(FOSM)法排序;第 2 项为 Tornado(龙卷风)图形法排序。

由表 3 可知,采用 2 种方法得到的随机变量敏感性排序结果几乎一致,2 种方法均表明:地震动强度和阻尼比对本文背景桥地震需求参数的影响大于其

他随机变量。

6 结 语

本研究以某大跨度中承式钢桁拱桥为研究对象,通过建立桥梁结构有限元模型,采用非线性时程分析法计算该桥的 4 种地震需求参数,运用一次二阶矩(FOSM)法、Tornado(龙卷风)图表法,分析地震需求参数对于几种相关不确定因

素的敏感度,进而对相关不确定因素进行重要性排序。得到如下结论。

(1)在研究选取的诸多不确定变量中,地震动参数 PGA 对背景桥地震响应的影响始终是排在第一位,这是因为地震的随机性远大于结构本身特性的随机性;阻尼比总是排在第二位,说明阻尼比对背景桥地震作用下关键部位的地震响应影响较大。

(2)混凝土弹性模量和混凝土容重对墩底弯矩和剪力的敏感性较大,即混凝土强度等级的选择对墩底内力的影响很大,结合工程需要选用合适强度等级的混凝土可以有效减小背景桥在地震作用下的墩底内力值。

(3)钢材弹性模量和容重对内力敏感性基本排在后面,说明了钢材弹性模量和容重对地震作用下背景桥的内力影响较小,即这两者不是地震作用下影响内力的主要因素。忽略这些非敏感因素的不确定性,将极大地提高分析的效率,而不会严重影响到分析的精度。

参考文献:

[1] 方乃平,许鑫,王帅.秭归长江公路大桥重型缆索吊机设计[J].桥梁建设,2022,52(1):116-123.
[2] 蒋本俊,余昆.湖北秭归长江公路大桥钢桁拱架设计[J].施工技术,2021,50(12):61-64;99.
[3] 杨灿,张铭.秭归长江公路大桥拱梁约束体系设计[J].桥梁建设,2019,49(6):90-95.
[4] 张令,徐略勤.近断层地震下大跨钢管混凝土拱桥损伤模式研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(3):204-215.
[5] 李子奇,李亮亮,王力,等.脉冲参数对 CFST 拱桥地震反应的影响[J].中国安全生产科学技术,2022,18(9):225-231.
[6] 叶丹,周建庭,王领,等.考虑河谷场地效应的大跨 CFST 拱桥地震响应分析[J].世界地震工程,2022,38(3):108-116.
[7] 乔新宇,王耀军.山区高墩梁式桥动力特性及抗震性能研究[J].公路,2023,68(7):159-163.
[8] 贺国京,黄伟.大跨度钢管混凝土拱桥空间地震响应分析[J].中南林业科技大学学报,2008,28(5):119-122.
[9] 张永亮,王云,虞庐松,等.行波效应对大跨上承式铁路钢桁拱桥地震反应的影响[J].振动与冲击,2020,39(12):213-220.
[10] 张永亮,王云,陈兴冲,等.多维激励下大跨上承式铁路钢桁拱桥

- 空间地震响应[J].中国铁道科学,2020,41(5):56-63.
- [11] 张永亮,冯鹏飞,陈兴冲,等.高阶振型对大跨度钢桁拱桥地震反应的影响[J].振动与冲击,2020,39(6):225-229;242.
- [12] 庞林,曾永平,陈克坚,等.近断层地震区铁路钢桁拱桥抗震性能和对策研究[J].高速铁路技术,2020,11(4):60-64;74.
- [13] 杨灿,张铭,张家元.大跨度中承式钢箱桁架拱桥抗震体系研究[J].世界桥梁,2022,50(1):86-92.
- [14] Porter K A, Beck J L, Shaikhutdinov R V. Sensitivity of building loss estimate to major uncertain variables[J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(4): 719-743.
- [15] Bake J W, Coner C A. Uncertainty specification and propagation for loss estimation using FOSM methods[R]. Berkeley: University of California, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2003: 68-82.
- [16] Aslani H, Miranda E. Probabilistic response assessment for building-specific loss estimation[R]. Berkeley: University of California, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2003: 38-56.
- [17] PAN Y, AGRAWAL A K, GHOSH M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York state[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 689-699.
- [18] TUBALDI E, BARBATO M, DALL'ASTA A. Influence of model parameter uncertainty on seismic transverse response and vulnerability of steel-concrete composite bridges with dual load path[J]. Journal of structural Engineering, 2012, 138(3): 363-374.
- [19] ISO 2394: 2015, ISO technical committees. General principles on reliability for structures[S].
- [20] GB 50068—2018, 建筑结构可靠性设计统一标准[S].
- [21] Porter K A, Beck J L, Shaikhutdinov R V. Sensitivity of building loss estimate to major uncertain variables[J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(4): 719-743.
- [22] 胡会勇,赵健,任延龙,等.广州明珠湾大桥主桥总体设计[J].桥梁建设,2021,51(3):93-99.
- [23] 吴文朋,李立峰,唐盛华,等.桥梁地震需求分析中建模不确定性的敏感性研究[J].振动与冲击,2018,37(24):257-264;270.
- [24] 刘金朝.大跨度斜拉桥地震动力响应的敏感性分析[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- [25] 尹攀,胡其高,李鹏.混凝土结构地震需求参数敏感性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(5):1954-1962.
- [26] 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.
- [27] 高小旺,鲍霁斌.地震作用的概率模型及其统计参数[J].地震工程与工程振动,1985(1):13-22.
- [28] 欧进萍,段宇博,刘会仪.结构随机地震作用及其统计参数[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1994(5):1-10.
- [29] Mirza S A, MacGregor J G. Variability of Mechanical Properties of Reinforced Bars[J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1989.
- [30] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [31] 李文华.基于可靠度理论的抗震框架体系性能研究[D].汕头:汕头大学,2007.
- [32] Ellingwood B R, Kinali K. Quantifying and communicating uncertainty in seismic risk assessment[J]. Structural safety, 2009, 31(2): 179-187.
- [33] 于晓辉.钢筋混凝土框架结构的概率地震易损性与风险分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [34] Porter K A, Beck J L, Shaikhutdinov R V. Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables[J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(4): 719-743.

(上接第307页)

- [14] 聂建国,袁彦声.钢-砼叠合板组合梁及其应用[J].建筑结构,1995(8):19-23.
- [15] 聂建国,陶慕轩,聂鑫,等.抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J].土木工程学报,2015,48(4):7-14;58.
- [16] 王毅,陈以一,王伟,等.钢管混凝土外包式柱脚抗弯性能试验研究[J].建筑结构,2009,39(6):5-8.
- [17] 周天华.方钢管混凝土柱——钢梁框架节点抗震性能及承载力研究[D].西安:西安建筑科技大学,2004.
- [18] GB 50157—2013, 地铁设计规范[S].
- [19] TB 10002—2017, 铁路桥涵设计规范[S].