

基础隔震结构不确定参数敏感性分析

王昊^{1,2}, 翁大根³, 罗超^{1,2}, 宋佳宁^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 大型基础设施防灾减灾协同创新中心, 河北 石家庄 050043; 3. 同济大学 土木工程防灾减灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 隔震结构系统参数的不确定性和地震的随机性可能会导致结构响应意想不到的偏移, 导致大幅减少安全性评价的准确度和精密度, 因此有必要探究隔震支座的不确定性因素对结构响应的影响。本文着重研究基础隔震钢筋混凝土结构的不确定性因素, 包括结构的不确定性和地震作用的不确定性。采用龙卷风图对结构不确定参数进行敏感性分析, 并对比隔震与非隔震结构的参数敏感性; 提出基于我国国情的双响应面法, 利用响应面模型同时考察地震动和基础隔震结构的不确定性对地震响应的影响。结果表明: 隔震技术可以减小结构不确定性的影响并且地震动的不确定性对结构的影响大大超过结构本身的不确定性。

关键词: 基础隔震; 参数敏感性; 响应面法; 龙卷风图; 随机性

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

Uncertainty parameters sensitivity analysis of base-isolated structures

WANG Hao^{1,2}, WENG Dagen³, LUO Chao^{1,2}, SONG Jianing^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Cooperative Innovation Center of Disaster Prevention and Mitigation for Large Infrastructure in Hebei province (Shijiazhuang Tiedao University), Shijiazhuang 050043, China; 3. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As the randomness of the earthquake and the inherent uncertainty of the structure, unexpected shifts might occur in the structure response, leading to a significant reduction in accuracy and precision of safety evaluation. Therefore, it is necessary to explore the influence of the uncertainty inherent in isolators on the structural response. This paper focuses on the study of the uncertainty of the base-isolated reinforced concrete structure, including the structural uncertainty and the stochastic earthquake. The parameter sensitivity of the random variables is analyzed by using tornado diagrams and compared for both the base-isolated and non-isolated structure. This paper proposes a dual response surface method based on China's national conditions, and uses the response surface model to investigate the impact of the uncertainty within in earthquake and structure on earthquake response. Results show that the base-isolation technology can reduce the influence of the uncertainty within structure and the influence of the randomness within the ground motion considerably exceeds the uncertainty within the structure.

Key words: base isolation; uncertainty parameters sensitivity; response surface method; tornado diagram; randomness

引言

基础隔震已是一项较为成熟的技术, 在实际工程中得到广泛应用。在基础隔震结构抗震设计时, 通常设

收稿日期: 2018-03-07; 修订日期: 2018-05-09

作者简介: 王昊(1989-), 女, 讲师, 博士, 主要从事消能减震及隔震建筑分析研究。E-mail: 303_wh@tongji.edu.cn

定确定性的参数进行设计分析,对隔震支座的不确定性因素较少探究。然而,由于基础隔震结构在建筑物与地基之间的产生较大相对位移,隔震装置本身容易成为地震作用下,特别是在超设计水准地震动作用下易损的关键部件,并且隔震结构系统参数的不确定性可能会导致意想不到的结构响应的偏移,导致大幅减少安全性评价的准确度和精密度。因此,研究基础隔震结构的不确定性因素并对结构的不确定性进行量化,具有十分重要的意义。

由于隔震结构的响应主要依赖于支座性能,并且隔震可以减小设备和结构的相互作用,防止结构构件进入非线性响应,隔震技术理论上可以减小这些不确定性的影响并且使得结构响应更加有可预测性^[1]。然而,目前国内外研究隔震支座不确定性以及不确定性量化的文献相对传统结构还较少。Han等^[2]同时考虑了上部结构和铅芯橡胶支座参数的随机性,对不确定性参数进行敏感性分析,研究了隔震结构经受余震的地震风险。Mishra等^[3]以隔震支座刚度、支座阻尼和支座屈服强度为随机变量,研究调查了隔震支座参数不确定性对基础隔震结构性能的影响。Castaldo等^[4]以支座的滑动摩擦系数为随机变量,研究了摩擦摆隔震支座的参数不确定性。Sandip等^[5]为研究影响隔震储罐的不确定性因素,选取标准化的屈服强度、屈服位移和支座阻尼三个参数作为铅芯橡胶支座的随机变量。Perotti等^[6]研究了隔震核电站的不确定性因素,选取分别代表隔震支座刚度、隔震支座阻尼的两个不确定性参数以及隔震支座屈服位移进行参数敏感性分析。刘娟^[7]等采用隔震支座的屈服刚度作为随机变量,通过隔震支座实验数据的统计分析,得到几种隔震支座的均值和标准差。目前,国内外学者基本上都是根据理论经验假定隔震支座不确定性参数的概率特征,极少数学者通过实验得到的支座不确定性参数统计特征也是基于少量实验样本得出的,不具有广泛的适用性。因此,隔震支座不确定性参数的概率模型和不确定性量化的研究还有待进一步展开。

本文以某基础隔震钢筋混凝土结构实例为研究对象,着重研究影响隔震结构地震响应的不确定性因素,包括隔震后上部结构、隔震层的不确定参数以及地震动的不确定参数。首先,对隔震结构的不确定参数进行参数敏感性分析,采用龙卷风图比较结构不确定性因素对隔震与非隔震结构的影响程度。其次,提出基于我国国情的双响应面法,以地震动加速度峰值为随机变量,将地震动的不确定性引入响应面模型中,从而同时考察地震动和基础隔震结构的不确定性对地震响应的影响。通过不确定参数的敏感性分析可以找出对基础隔震结构影响较大的随机变量,对比隔震与非隔震结构的参数敏感性,考量基础隔震结构减少不确定参数对结构影响的程度。

1 隔震结构工程概况及有限元模型

本文研究对象为某钢筋混凝土框架结构,抗震设防类别为乙类,抗震设计基本烈度为8度半(0.3g),建筑场地为Ⅱ类,设计地震分组为第三组。设计隔震目标为:采用基础隔震技术后上部结构降低一度设防,即上部结构按烈度7度(0.15g)进行设防。选取符合要求的43个铅芯橡胶支座(LRB),支座主要力学性能见表1。在设置隔震支座时,将结构第一层的柱子在中上部截断,隔震支座安装固定在截断的柱子中间,支座平面布置图见图1。考虑到在大型通用有限元软件ANSYS二次开发方便,具有成熟的可靠度分析模块接口功能,因而本文采用ANSYS软件对隔震结构进行有限元建模,见图2。梁和柱使用BEAM189建模,混凝土应力-应变关系为Mander约束混凝土应力应变关系,本构模型采用服从von Mises屈服准则的多段线性动力强化弹塑性模型,隔震支座利用COMBIN40单元模拟。

表1 铅芯橡胶支座力学性能

Table 1 Mechanical properties of lead rubber bearings

产品 型号	基准面压 (MPa)	长期荷载 (kN)	竖向刚度 K_v (kN/mm)	初始刚度 K_1 (kN/mm)	屈服后刚度 K_d (kN/mm)	等效刚度 K_h (kN/mm)	屈服力 Q_d (kN)	阻尼比 H_{eq} (%)
LRB700	15	5603	3157	14.213	1.093	1.643	76	20.4
LRB800	15	7275	3671	16.447	1.265	2.052	123	23.1
LRB900	15	9202	4260	18.511	1.424	2.337	160	23.5

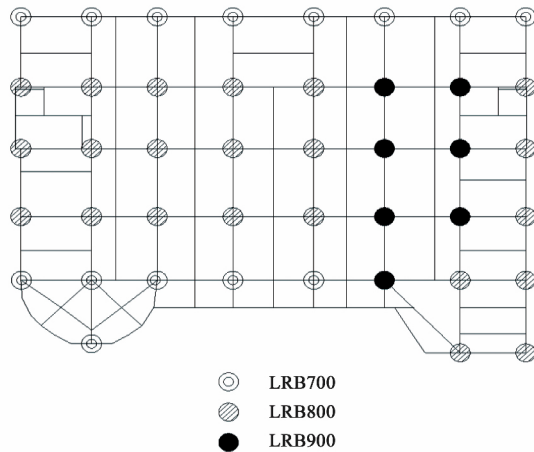


图1 隔震支座平面布置图

Fig. 1 Floor plan of isolators

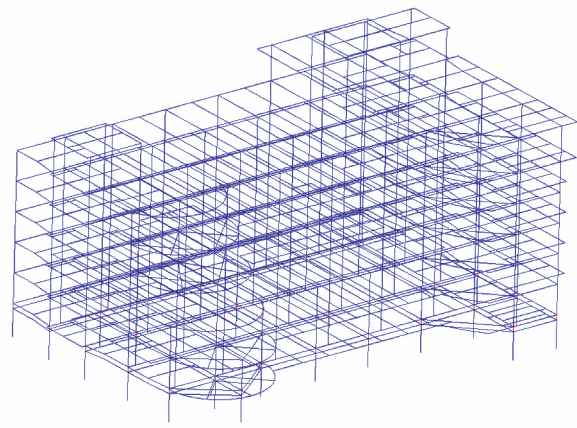


图2 基础隔震结构 ANSYS 模型示意图

Fig. 2 ANSYS model of the base-isolated structure

2 隔震结构不确定性参数

隔震结构的不确定性因素主要集中在结构构件的强度、刚度、变形能力和耗能特性上。当使用非线性时程分析对结构进行抗震分析时,隔震后上部结构的不确定性可以很大程度地体现在钢筋和混凝土材料的变异性上。受到原材料、制作工艺以及环境等众多因素的影响,混凝土材料本身的不确定性要远远高于钢筋。李杰^[8]等通过实验证明钢筋的材性指标比较稳定,相同类型结构在受力过程中所表现出来的差异几乎全部源于混凝土材料的随机性。因此,本文主要考虑混凝土材料的不确定性。当混凝土本构模型采用 Mander 模型时,混凝土弹性参数的不确定性可以通过弹性模量和密度的不确定性来考虑,同时,混凝土的非线性可以通过混凝土抗压强度来考虑。因此,参考国内外相关文献及规范^[2,9-22],结合结构动力响应特性,本文选取混凝土抗压强度 f_c 、混凝土弹性模量 E_c 和结构容重 γ_w 作为上部结构的随机变量,并假定随机变量之间相互独立。上部结构随机变量的统计特征见表2。表2中混凝土抗压强度 f_c 的不确定性由混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 表征,假定立方体抗压强度标准值符合正态分布,均值为我国规范规定的立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的1.25倍,对于C30混凝土为37.5 MPa,对于C40混凝土为50 MPa,变异系数均为18%。表2中 G_k 为恒荷载标准值,取 $G_k = 27 \text{ kN/m}^3$ 。

对于铅芯橡胶支座,初始刚度 K_1 、水平屈服后刚度 K_d 、等效刚度 K_b 和屈服力 Q_d 均是表征支座剪切性能的重要参数。其中,水平屈服后刚度 K_d 和屈服力 Q_d 可以较好地表征隔震支座在较大地震作用下的性能。因此,参考国内外相关文献及规范^[2,3,5,7,18,23-25],本文选取水平屈服后刚度 K_d 和屈服力 Q_d 这两个参数作为铅芯橡胶隔震支座的随机变量,并假定随机变量之间相互独立。隔震支座的不确定性参数的统计特征见表2。

表2 隔震结构随机变量统计特征

Table 2 Statistical characteristics of random variables of isolation structures

随机变量	平均值	变异系数	分布类型
混凝土抗压强度标准值 $f_{cu,k}$	$1.25f_{cu,k}$	0.18	正态分布
混凝土弹性模量 E_c	初始设计值	0.10	正态分布
结构容重 γ_w	$1.050G_k$	0.10	正态分布
铅芯橡胶支座水平屈服后刚度 K_d	100% 剪切应变对应的等效刚度(kN/mm)	0.15	正态分布
铅芯橡胶支座屈服力 Q_d	100% 剪切应变对应的屈服力(kN)	0.15	正态分布

3 隔震结构的参数敏感性分析

本文选取最大层间位移角 θ_{\max} 和隔震支座最大位移 δ_{LRB} 作为工程需求参数。选取美国太平洋地震研究

中心(PEER) 强震数据库中的 10 组天然地震波进行参数敏感性分析, 所选用的天然地震波场地条件符合所述工程场地条件, 将 10 组地震波拟合得到的标准反应谱与规范反应谱比较, 绘于图 3。

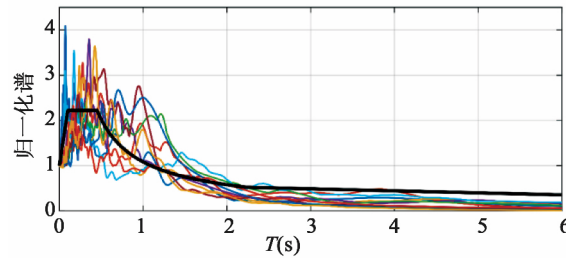


图 3 参数敏感性分析地震波归一化反应谱曲线

Fig. 3 Normalized response spectrum for parameter sensitivity analysis

隔震结构不确定性参数敏感性分析的基本思路为: 通过对某一个随机变量进行扰动而其他随机变量保持不变, 来观察这一随机变量对结构响应的变化大小, 逐一改变随机变量, 根据对地震响应的影响大小来判断其敏感性。根据各随机变量的数字统计特征, 确定随机变量的上界、下界以及中值, 分别对应 10%、90% 以及 50% 的概率分位数。首先, 将所有的随机变量取其 50% 分位值并分别输入小震、中震和大震 3 种概率水平地震波, 进行非线性时程分析。分别统计结构在小、中、大震作用下的地震响应, 假定结构响应符合正态分布, 利用极大似然方法来估计的结构响应的均值 μ 和标准差 σ 。然后, 选取某一随机变量, 改变这一变量取值而保持其他变量为中值, 分别用 10% 分位值和 90% 分位值代替这一变量的中值, 重新建立有限元分析模型, 并分别输入小震、中震和大震三种概率水平地震波, 进行非线性时程分析。最后, 逐一改变随机变量的取值, 得到每一随机变量取值变化后的响应均值 μ 和标准差 σ 。以上过程也称为变量的条带分析。

上部结构最大层间位移角 θ_{max} 在小、中、大震作用下的均值和标准差如图 4 所示。隔震支座最大相对位移 δ_{LRB} 在小、中、大震作用下的均值和标准差见图 5。

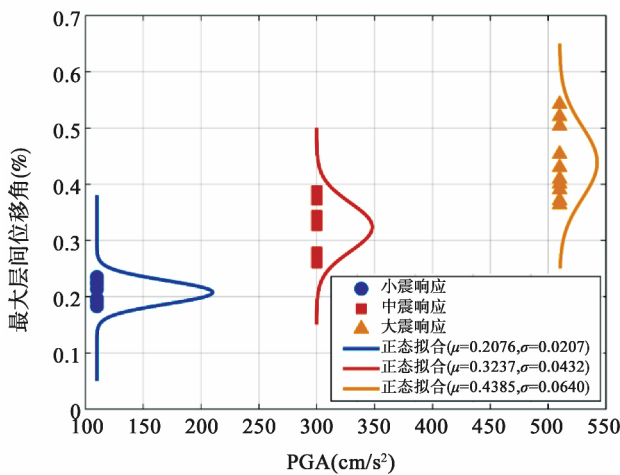


图 4 隔震结构中值模型上部结构最大层间位移角条带分析

Fig. 4 Banding analysis of the maximum interstory drift of the median model

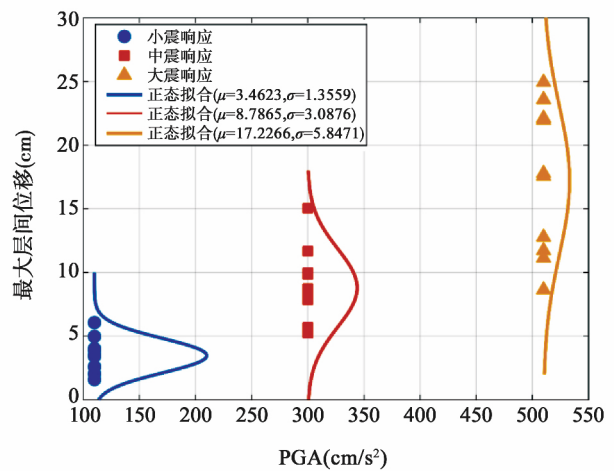


图 5 隔震结构中值模型隔震层最大位移条带分析

Fig. 5 Banding analysis of the maximum displacement of the median model

基于以上条带法分析的结果, 绘制龙卷风图(Tornado Diagram) 以显示不确定参数的敏感性。将结构响应的均值 μ 和标准差 σ 在相同的概率分布区间的变化情况绘制在同一图中, 并按其敏感性大小进行从上至下依次排列。上部结构最大层间位移角在小、中、大震作用下的龙卷风图见图 6 ~ 图 11。隔震层最大位移在小、中、大震作用下的龙卷风图分别见图 12 ~ 图 14。以上图中, 桔色代表随机变量 10 分位值, 紫色代表随机变量 90 分位值, 红色表示两者重叠部分。

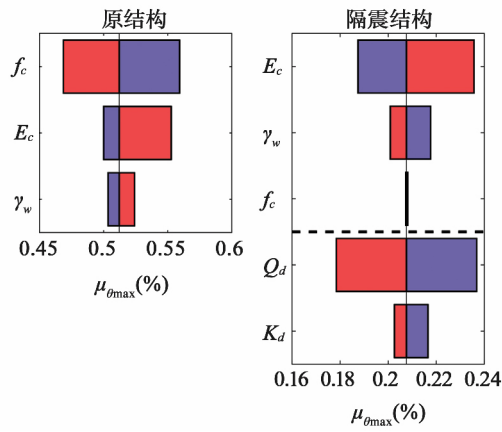


图6 小震作用下非隔震与隔震结构最大层间位移角均值龙卷风图

Fig.6 Tornado diagram of the mean value of the maximum interstory drift of the base-isolated and non-isolated structure under minor earthquakes

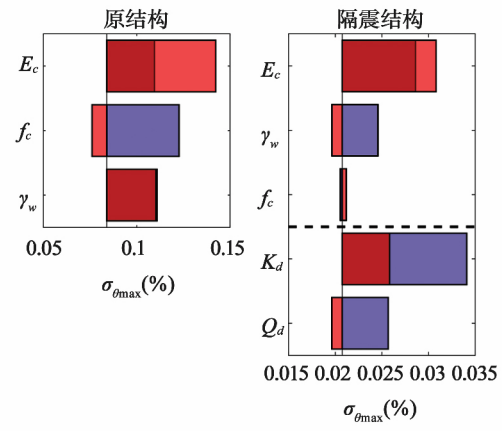


图7 小震作用下非隔震与隔震结构最大层间位移角标准差龙卷风图

Fig.7 Tornado diagram of the standard deviation of the maximum interstory drift of the base-isolated and non-isolated structure under minor earthquakes

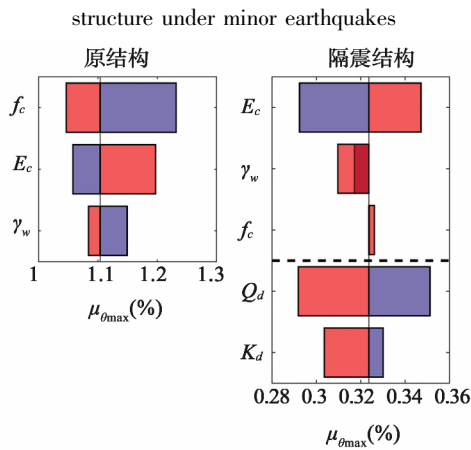


图8 中震作用下非隔震与隔震结构最大层间位移角均值龙卷风图

Fig.8 Tornado diagram of the mean value of the maximum interstory drift of the base-isolated and non-isolated structure under moderate earthquakes

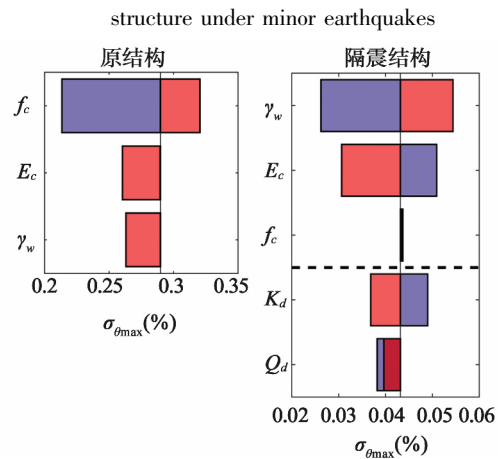


图9 中震作用下非隔震与隔震结构最大层间位移角标准差龙卷风图

Fig.9 Tornado diagram of the standard deviation of the maximum interstory drift of the base-isolated and non-isolated structure under moderate earthquakes

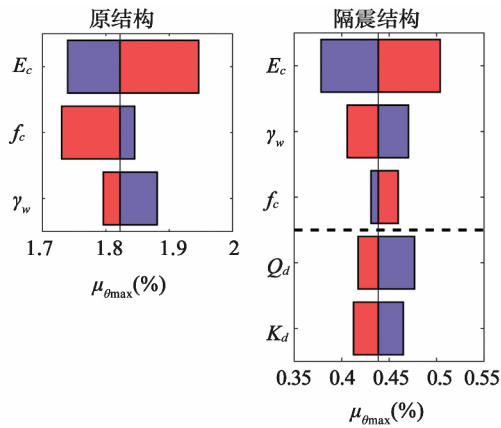


图10 大震作用下非隔震与隔震结构最大层间位移角均值龙卷风图

Fig.10 Tornado diagram of the mean value of the maximum interstory drift of the base-isolated and non-isolated structure under major earthquakes

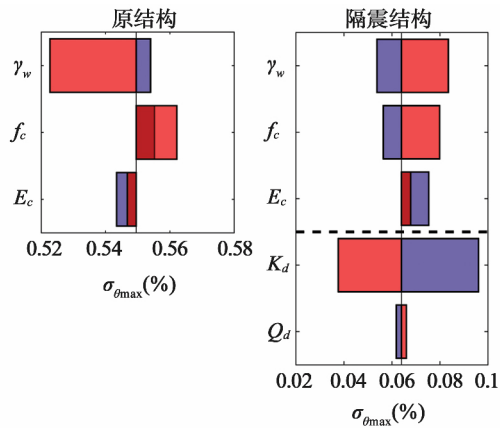


图11 大震作用下非隔震与隔震结构最大层间位移角标准差龙卷风图

Fig.11 Tornado diagram of the standard deviation of the maximum interstory drift of the base-isolated and non-isolated structure under major earthquakes

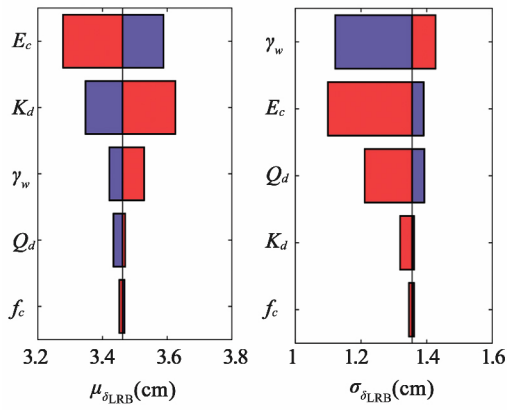


图 12 小震作用下隔震支座最大位移龙卷风图
移角均值龙卷风图

Fig. 12 Tornado diagram of the maximum displacement of the base-isolated structure under minor earthquakes

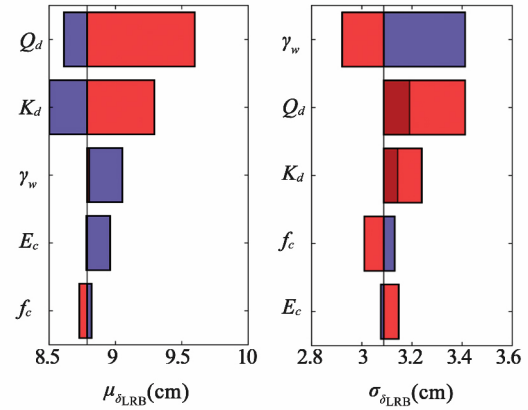


图 13 中震作用下隔震支座最大位移龙卷风图
角标准差龙卷风图

Fig. 13 Tornado diagram of the maximum displacement of the base-isolated structure under moderate earthquakes

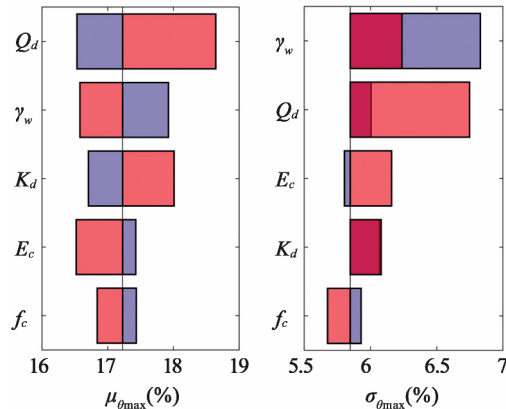


图 14 大震作用下隔震支座最大位移龙卷风图

Fig. 14 Tornado diagram of the maximum displacement of the base-isolated structure under major earthquakes

4 考虑地震动不确定性的参数敏感性分析

4.1 双响应面法基本原理

响应面法的基本思想是:用包含未知参数的简单函数代替真实复杂的函数,通过试验设计的方式得到适量的设计点并运用有限元方法计算这些样本点的功能函数值,然后计算函数模型的未知参数,拟合得到结构功能函数与随机变量的显式表达式。为考虑地震动的不确定性,采用双响应面法将地震动的不确定性引入响应面模型中。双响应面法重复收集试验设计中每次运行时的样本,将样本平均值作为一个响应输入,而样本标准差作为第二个响应输入,利用均值响应实现目标拟合,利用标准差响应保证拟合函数对不可控因素具有鲁棒性。

本文基于 Towashiraporn^[26]的研究成果,同时结合我国国情,提出适合我国结构工程的改进的双响应面地震易损性分析方法。将地震动强度设定为我国《抗震设计规范》^[27]规定的“小震”、“中震”、“大震”3个强度。在试验设计时,将标准化后的地震波分为3组,分别调幅至“小震”、“中震”、“大震”对应的强度。“小震”、“中震”、“大震”3个强度的地震波分别对应于试验设计中的下限值、中值和上限值。这样,地震动强度参数就可以与结构输入变量一起进行试验设计。以地震动强度为响应面输入参数的响应面函数均值和标准差分别为:

$$\hat{y}_\mu = g(x, \text{IM}) \tag{1}$$

$$\hat{y}_\sigma = h(x, \text{IM}) \tag{2}$$

式中,IM(Intensity Measure)为地震动强度参数。假设结构响应服从正态分布,则响应面函数可用下式表达:

$$\hat{y} = g(x, \text{IM}) + N[0, h(x, \text{IM})] \quad (3)$$

4.2 地震动的不确定性

为充分考虑地震动输入的不确定性, 本文将结合箱装法^[28-29] (bin method) 选用 60 条地震波进行结构地震易损性分析。根据结构所处的场地条件, 所需地震动记录从太平洋地震工程研究中心的新一代地震记录数据库中选取。确定地震波的选取原则为^[30]: (1) 震中距小于 50 km; (2) 地震震级分布于 5.5~9.0; (3) 场地条件符合结构所在场地类型; (4) 尽量减少同一次地震的地震波。随后采用箱装法, 以震级为标准来区分大小地震, 以震中距来定义近远场地震, 将地震波选取范围以震级和震中距为标准划分为 5 个箱。

每个箱选取 12 组地震波, 将 12 条地震波的中值谱加速度值与规范设计反应谱对比, 以保证所选地震波能代表每个箱范围内的地震波。按箱装法选取的地震波分布图见图 15, 同一个箱型内的地震波用同一种颜色标注出来。从图 15 中可以看出, 本文选取的地震波在各个震级和震中距范围内分布较为均匀, 能够体现一定地随机性。将各条地震波的反应谱曲线与规范反应谱曲线对比, 绘于图 16。

综合国内外文献^[31-33], 地面峰值加速度 PGA 与结构响应峰值的相关性较大, 同时考虑到我国抗震设防的依据为设防烈度, 可转换为设计基本地震加速度, 因此, 在本文研究中将以地震波加速度峰值 PGA 作为地震动强度参数。

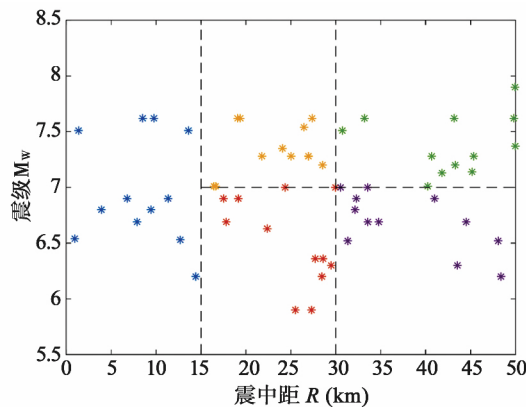


图 15 箱装法选取的地震波分布图

Fig. 15 The distribution of seismic waves selected by the bin method

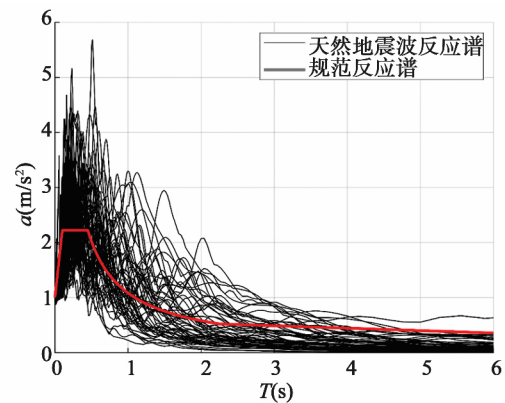


图 16 60 条天然地震波与规范反应谱曲线

Fig. 16 60 natural seismic waves and the standard response spectrum curve

4.3 隔震结构双响应面模型

隔震结构的有限元建模以及动力时程分析仍在 ANSYS 软件平台上进行, 选取对结构影响较大的不确定性参数: 混凝土弹性模量 E_c 、结构容重 γ_w 、隔震支座屈服力 Q_d 和屈服后刚度 K_d , 地震动输入不确定参数为地面峰值加速度 PGA。

采用中心复合设计法进行试验设计, 为了使每个变量的范围尽可能包含随机抽样的区域, 试验设计中采用 $\mu + 2\sigma$ 的原则进行取值, 即选取 1 个中心点为均值点 $x_M = (\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})$, 2^n 个象限点为 $(x_{M1} \pm 2\sigma_1, \dots, x_{Mi} \pm 2\sigma_i, \dots, x_{Mn} \pm 2\sigma_n)$, $2n$ 个轴线点为 $(x_{M1}, \dots, x_{Mi} \pm \alpha\sigma_i, \dots, x_{Mn})$, $\alpha = \sqrt{2^n} = \sqrt{2^5}$ 。同时, 为了提高计算效率和拟合效果, 对结构的随机变量进行标准化处理, 随机变量上限值、下限值和中心值分别用 $+\alpha$ 、 $+1$ 、 0 和 -1 、 $-\alpha$ 与其对应。地震动强度参数 PGA 下限值、中值和上限值分别为 1.1 m/s^2 、 3.0 m/s^2 和 5.1 m/s^2 。

将地震动强度参数就与结构输入变量一起进行中心复合设计, 5 个输入随机变量进行试验设计共有 43 组试验。每个实验设计点对应 20 条同一地震幅值的天然地震波进行非线性动力时程分析, 计算每个设计点 20 条地震波的最大层间位移角和隔震支座最大相对位移的均值 $\mu_{\theta_{\max}}$ 、 $\mu_{\delta_{LRB}}$ 与标准差 $\sigma_{\theta_{\max}}$ 、 $\sigma_{\delta_{LRB}}$ 。

根据试验设计结果, 可通过最小二乘法将数据的均值和标准差拟合二次响应面。上部结构最大层间位移角 θ_{\max} 拟合的均值 $\hat{y}_{\mu_{\theta_{\max}}}$ 和标准差 $\hat{y}_{\sigma_{\theta_{\max}}}$ 多项式响应面函数分别为:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\mu_{\theta_{\max}}} = & 0.0882 - 0.0283\xi_1 + 0.0083\xi_2 - 0.0015\xi_3 + 0.0332\xi_4 + 0.1064\xi_5 \\ & - 0.0032\xi_1\xi_2 - 0.0012\xi_1\xi_3 - 0.0055\xi_1\xi_4 - 0.0095\xi_1\xi_5 + 0.0009\xi_2\xi_3 \\ & + 0.0015\xi_2\xi_4 + 0.0047\xi_2\xi_5 - 0.0033\xi_3\xi_4 + 0.0076\xi_3\xi_5 + 0.0023\xi_4\xi_5 \\ & + 0.0085\xi_1^2 - 0.0089\xi_2^2 + 0.0031\xi_3^2 + 0.0035\xi_4^2 - 0.0068\xi_5^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\sigma_{\theta_{\max}}} = & -0.0009 - 0.0059\xi_1 - 0.0038\xi_2 - 0.0062\xi_3 + 0.0173\xi_4 \\ & + 0.0235\xi_5 - 0.0029\xi_1\xi_2 + 0.0001\xi_1\xi_3 + 0.0014\xi_1\xi_4 - 0.0012\xi_1\xi_5 \\ & + 0.0004\xi_2\xi_3 - 0.0047\xi_2\xi_4 + 0.0039\xi_2\xi_5 - 0.0068\xi_3\xi_4 + 0.0062\xi_3\xi_5 \\ & - 0.0063\xi_4\xi_5 + 0.0077\xi_1^2 - 0.0027\xi_2^2 + 0.0076\xi_3^2 + 0.0011\xi_4^2 - 0.0002\xi_5^2 \end{aligned} \quad (5)$$

隔震层最大位移 δ_{LRB} 拟合的均值 $\hat{y}_{\mu_{\delta_{LRB}}}$ 和标准差 $\hat{y}_{\sigma_{\delta_{LRB}}}$ 多项式响应面函数分别为:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\mu_{\delta_{LRB}}} = & 26.2748 + 0.1473\xi_1 - 0.8088\xi_2 - 1.2292\xi_3 + 3.7616\xi_4 \\ & - 5.2507\xi_5 - 0.4434\xi_1\xi_2 + 0.164\xi_1\xi_3 + 0.0723\xi_1\xi_4 + 0.0138\xi_1\xi_5 \\ & - 1.0994\xi_2\xi_3 - 1.8839\xi_2\xi_4 + 3.3774\xi_2\xi_5 + 0.8298\xi_3\xi_4 - 1.8545\xi_3\xi_5 \\ & - 4.5643\xi_4\xi_5 + 0.1073\xi_1^2 + 0.9964\xi_2^2 + 0.4854\xi_3^2 + 2.9656\xi_4^2 + 6.0847\xi_5^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\sigma_{\delta_{LRB}}} = & -0.7541 + 0.2899\xi_1 - 2.8237\xi_2 + 0.9583\xi_3 + 3.2598\xi_4 \\ & + 7.1400\xi_5 - 0.7407\xi_1\xi_2 - 0.1196\xi_1\xi_3 + 0.4795\xi_1\xi_4 + 0.0022\xi_1\xi_5 \\ & - 2.4254\xi_2\xi_3 - 3.2092\xi_2\xi_4 + 3.5117\xi_2\xi_5 + 1.1306\xi_3\xi_4 - 2.0055\xi_3\xi_5 \\ & - 4.1858\xi_4\xi_5 + 1.2025\xi_1^2 + 2.2630\xi_2^2 + 0.0976\xi_3^2 + 4.5169\xi_4^2 + 2.3010\xi_5^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中,变量 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ξ_4 均为标准化空间中经过归一化处理的隔震结构无量纲随机变量; ξ_5 为地震动强度参数的随机变量,拟合时按照 1.1 m/s^2 、 3.0 m/s^2 和 5.1 m/s^2 取值拟合。

因此,上部结构最大层间位移角 θ_{\max} 和隔震层位移 δ_{LRB} 的响应面函数为:

$$\hat{y}_{\theta_{\max}} = \hat{y}_{\mu_{\theta_{\max}}}(\text{PGA}) + N[0, \hat{y}_{\sigma_{\theta_{\max}}}(\text{PGA})] \quad (8)$$

$$\hat{y}_{\delta_{LRB}} = \hat{y}_{\mu_{\delta_{LRB}}}(\text{PGA}) + N[0, \hat{y}_{\sigma_{\delta_{LRB}}}(\text{PGA})] \quad (9)$$

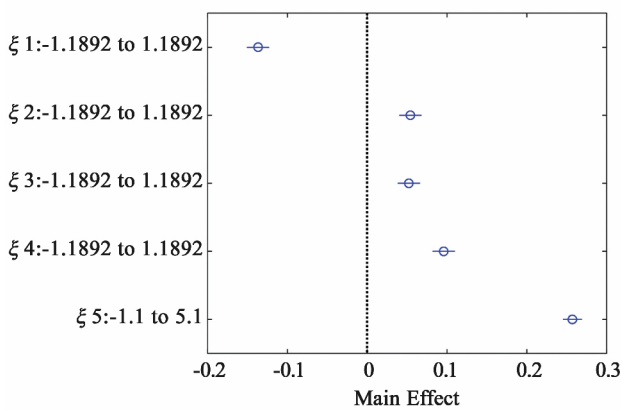


图 17 各随机变量对上部结构最大层间位移角均值的影响

Fig. 17 The influence of random variables on the mean value of the maximum interstory drift of the superstructure

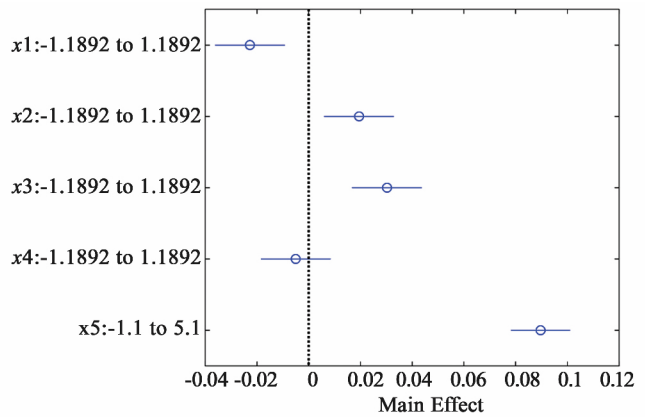


图 18 各随机变量对上部结构最大层间位移角标准差的影响

Fig. 18 The influence of random variables on the standard deviation of the maximum interstory drift of the superstructure

绘制各个输入随机变量对均值和标准差的影响系数,分别如图 17 和图 18 所示,图中,纵坐标为各个随机变量的取值范围,横坐标为影响系数。从至图中可以看出,地震动的不确定性对上部结构层间位移角的影响大大超过结构本身的不确定性。除地震动加速度峰值 PGA 的影响最大外,混凝土弹性模量 E_c 对 (ξ_1) 上部结构层间位移角均值的影响较大。

5 结论

本文讨论了地震动的随机性及结构本身的变异性,对比了隔震与非隔震结构参数敏感性。从隔震结构的参数敏感性分析中可以得出以下结论:

(1) 地震动的不确定性对结构的影响大大超过结构本身的不确定性。

(2) 对于隔震结构,上部结构不确定性参数中,混凝土弹性模量 E_c 、结构容重 γ_w 和隔震支座的两个不确定性参数屈服力 Q_d 、屈服后刚度 K_d 对上部结构层间位移角和隔震层最大位移的影响较大,而混凝土抗压强度 f_c 的敏感性较小,可以不考虑其对上部结构层间位移角和隔震层最大位移不确定性的影响。

(3) 混凝土抗压强度 f_c 对隔震与非隔震结构层间位移角的影响有较大区别。造成这一现象的本质原因即隔震具有良好的减震效果,使得上部结构混凝土基本不进入弹塑性状态。

(4) 隔震与非隔震结构在大震作用时,上部结构参数敏感性的排序较为一致。

(5) 隔震支座的设置使得影响结构的不确定参数从上部结构随机变量转移到隔震支座随机变量上来。隔震结构的两个不确定性参数铅芯橡胶支座屈服力 Q_d 和隔震支座水平屈服后刚度 K_d 对层间位移角的影响较大。隔震后上部结构随机变量的敏感性与相应的原结构相比显著减小,隔震支座可以有效减小上部结构不确定性的影响并且使得结构响应更加有可预测性。

参考文献:

- [1] Wang H, Weng D, Lu X, et al. Life-cycle cost assessment of seismically base-isolated structures in nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Design. 2013, 262: 429–434.
- [2] Han R, Li Y, van de Lindt J. Seismic risk of base isolated non-ductile reinforced concrete buildings considering uncertainties and mainshock—aftershock sequences[J]. Structural Safety. 2014, 50: 39–56.
- [3] Mishra S K, Chakraborty S. Performance of a base-isolated building with system parameter uncertainty subjected to a stochastic earthquake[J]. International Journal of Acoustics and Vibration. 2013, 18(1): 7–19.
- [4] Castaldo P, Palazzo B, Della Vecchia P. Seismic reliability of base-isolated structures with friction pendulum bearings[J]. Engineering Structures. 2015, 95: 80–93.
- [5] Saha S K, Matsagar V, Chakraborty S. Uncertainty quantification and seismic fragility of base-isolated liquid storage tanks using response surface models[J]. Probabilistic Engineering Mechanics. 2016, 43: 20–35.
- [6] Perotti F, Domaneschi M, De Grandis S. The numerical computation of seismic fragility of base-isolated Nuclear Power Plants buildings[J]. Nuclear Engineering and Design. 2013, 262: 189–200.
- [7] 刘娟. 高层隔震建筑基于性能的抗震设防及地震易损性分析[D]. 广州: 广州大学, 2014.
LIU Juan. Performance-based seismic design and seismic vulnerability analysis for isolated high-rise buildings[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [8] 李奎明. 钢筋混凝土短肢剪力墙结构试验研究与非线性随机演化分析[D]. 上海: 同济大学, 2007.
LI Kuiming. Experiment research and non-linear stochastic evolution analysis of RC short-leg shear walls[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [9] GB 50010–2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50010–2010. Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2010. (in Chinese)
- [10] 易伟建, 何肖煌. 中美两国混凝土结构设计规范可靠性比较[J]. 建筑结构. 2017, 47(4): 1–6.
YI Weijian, HE Xiaohuang. Comparison of reliability provisions in Chinese and American codes on structural concrete design[J]. Building Structure. 2017, 47(4): 1–6. (in Chinese)
- [11] Celik O C, Ellingwood B R. Seismic fragilities for non-ductile reinforced concrete frames—Role of aleatoric and epistemic uncertainties[J]. Structural Safety. 2010, 32(1): 1–12.
- [12] Y K Wen B R E, D Veneziano A J B. Uncertainty modeling in earthquake engineering[R]. Urbana, IL: MAE Center, 2003.
- [13] Ellingwood B, Galambos T V. Development of a probability based Load criteria for american national standard A58, building code requirements for minimum design loads in buildings and other structures[M]. Washington, D. C.: National Bureau of Standards, 1980.
- [14] Pan Y, Agrawal A K, Ghosn M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York state[J]. Journal of Bridge Engineering. 2007, 12(6): 689–699.
- [15] Mahan M, Unanwa C. Statistical Analysis of Concrete Compressive Strengths for California Highway Bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2014, 28(1): 157–167.
- [16] Macgregor J G. Safety and limit states design for reinforced concrete[J]. CAN. J. CIV. ENG. 1976, 3: 484.
- [17] 刘扬. 混凝土斜拉桥施工期的时变可靠性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.

- LIU Yang. The research of time-dependent reliability of concrete cable-stayed bridges during construction [D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)
- [18] 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.
WU Wenzheng. Seismic fragility of reinforced concrete bridges with consideration of various sources of uncertainty. [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [19] 李奎明, 李 杰. 双连梁短肢剪力墙结构非线性随机演化分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版. 2009, 37(04): 432 - 439.
LI Kuiming, LI Jie. Non-linear stochastic evolution analysis of short-leg shear wall with dual binding beams [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(04): 432 - 439. (in Chinese)
- [20] Jung J K P H. A statistical analysis of the modulus of elasticity and compressive strength of concrete C45/55 for pre-stressed precast beams [J]. Journal of Civil Engineering and Architecture. 2012, 6(11): 1571 - 1576.
- [21] GB 50068 - 2001 建筑结构设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
GB 50068 - 2001 Unified Standard for Reliability Design of Building Structures [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2001. (in Chinese)
- [22] Nowak A S. Calibration of LRFD bridge code [J]. Journal of Structural Engineering-ASCE. 1995, 121(8): 1245 - 1251.
- [23] Constantinou M C, Multidisciplinary C F E E. LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators [M]. Buffalo, NY: MCEER, 2011.
- [24] 邹 勤. 近海隔震桥梁基于性态的抗震设防标准易损性分析及应用[D]. 广州: 广州大学, 2014.
ZOU Qin. Performance-based seismic design criteria, vulnerability analysis and application for offshore isolated bridge [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [25] GB 20688. 3 - 2006 橡胶支座-第3部分建筑隔震橡胶支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
GB 20688. 3 - 2006 Rubber bearings-Part 3: Elastomeric Seismic-Protection Isolators for Buildings [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [26] Towashiraporn P. Building seismic fragilities using response surface metamodels [D]. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology, 2004.
- [27] GB5001 - 2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB5001 - 2010 Code for Seismic Design of Buildings [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2010. (in Chinese)
- [28] Simon J, Bracci J M, Gardoni P. Seismic response and fragility of deteriorated reinforced concrete bridges [J]. Journal of Structural Engineering. 2010, 136(10): 1273 - 1281.
- [29] 姜 维. 连续梁桥的地震易损性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
JIA Wei. Fragility analysis of RC-continuous highway bridge [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [30] Rezaeian S, Bozorgnia Y, Idriss I M, et al. Damping scaling factors for elastic response spectra for shallow crustal earthquakes in active tectonic regions [J]. Earthquake Spectra. 2014, 30(2): 939 - 963.
- [31] Padgett J E, Nielson B G, Desroches R. Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2008, 37(5): 711 - 725.
- [32] Saha S K, Matsagar V A, Jain A K. Seismic fragility of base-isolated water storage tanks under non-stationary earthquakes [J]. Bulletin of Earthquake Engineering. 2016, 14(4): 1153 - 1175.
- [33] 李 杨. 近场地震作用下钢筋混凝土桥梁的地震易损性分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
LI Yang. Seismic vulnerability analysis of reinforced concrete bridges subjected to near-fault ground motion [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)