

DOI:10.11918/202007110

西安地区一致危险谱与一致风险谱的构建

王丛^{1,2}, 吕大刚^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 为了使不同地区的结构在地震作用下具有相同的倒塌概率,对一致风险谱进行了研究。本文首先通过概率地震危险性分析得到了西安地区的一致危险谱,通过风险积分法得到了西安地区的一致风险谱,将一致危险谱与一致风险谱进行对比发现,基于一致危险谱进行抗震设计的建筑结构在地震作用下具有不同的倒塌概率。然后通过近似解析法构建了西安地区的一致风险谱,将两种方法得到的一致风险谱进行对比发现,如果地震危险性函数能够很好地描述场地的地震危险性,两种方法得到的一致风险谱相差很小。最后分析了结构地震易损性的对数标准差 β 对一致风险谱、风险系数 R_c 、风险导向地震动参数的比例系数的影响。研究表明: β 对大震一致风险谱的影响不大, $\beta \leq 0.7$ 时,对中震一致风险谱的影响大, $\beta > 0.7$ 时,对巨震一致风险谱的影响大; $\beta < 0.7$ 时, R_c 随着 β 增大而减小, $\beta \geq 0.7$ 时, R_c 随着 β 增大而增大; β 对风险导向巨震和风险导向中震之间的比例系数的影响大于对风险导向大震和风险导向中震之间的比例系数的影响。

关键词: 一致风险谱;一致危险谱;风险积分法;近似解析法;参数影响分析

中图分类号: TU312

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)04-0151-09

Construction of uniform hazard spectra and uniform risk spectra in Xi'an region

WANG Cong^{1,2}, LÜ Dagang^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To ensure that the structures in different regions have the same collapse probability under earthquakes, uniform risk spectra are investigated in this paper. First, the uniform hazard spectra of Xi'an region were obtained through probabilistic seismic hazard analysis, and the uniform risk spectra were obtained through risk integral method. By comparing the uniform hazard spectra with the uniform risk spectra, it was found that seismic design based on the uniform hazard spectra resulted in different collapse probabilities of structures under earthquakes. Then, the uniform risk spectra in Xi'an region were constructed through analytical method, and the uniform risk spectra obtained by risk integral method and analytical method were compared. It was found that the difference in the uniform risk spectra was small if the seismic hazard of the site was well described by the seismic hazard function. Finally, the effects of the logarithmic standard deviation (β) of seismic fragility on the uniform risk spectra, risk coefficient (R_c), and coefficient among risk-targeted ground motions were analyzed. Results show that β had little effect on the uniform risk spectra of maximum considered earthquake, while it had significant effect on the uniform risk spectra of design basis earthquake and very rare earthquake when β was less than or equal to 0.7 and greater than 0.7, respectively. When β was less than 0.7, R_c decreased with the increase of β , while R_c increased with the increase of β when β was greater than or equal to 0.7. The effect of β on the coefficient between the risk-targeted very rare earthquake and design basis earthquake was greater than that on the coefficient between the risk-targeted maximum considered earthquake and design basis earthquake.

Keywords: uniform risk spectra; uniform hazard spectra; risk integral method; analytical method; parameter effect analysis

近年来,基于一致风险的抗震设防水平决策和结构抗地震倒塌设计成为国内外地震工程领域共同

关注的课题。例如,Shi等^[1]通过研究相同抗震设防水平不同地区的既有建筑倒塌风险发现,不同地区的倒塌风险有很大不同。这表明基于一致危险谱进行抗震设计并不能保证不同地区的建筑结构具有一致的倒塌风险,其原因是基于一致危险性进行抗震设防仅考虑了场地的地震危险性,并没有考虑到

收稿日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51678209)

作者简介: 王丛(1991—),女,博士研究生;

吕大刚(1970—),男,教授,博士生导师

通信作者: 吕大刚, ludagang@hit.edu.cn

结构的地震易损性。因此,抗震设防水平应该从具有相同超越概率的“一致危险”原则向具有相同倒塌风险的“一致风险”原则过渡。

FEMA P695^[2]中提出用倒塌裕度比作为结构抗地震倒塌能力的测度,并将其定义为倒塌水平地震动与大震地震动参数的比值,其中,倒塌水平地震动取结构倒塌易损性曲线的中位值。Luco 等^[3]基于“风险导向”原理提出的“风险导向地震动”概念可以使不同地区的建筑结构在地震作用下具有一致的倒塌风险。FEMA P750^[4]中引入了风险导向地震动的概念,使美国的抗震设防水平从 50 a 超越概率 2% 的一致危险原则转变成了 50 a 倒塌概率 1% 的一致风险原则。之后,ASCE 7 - 10^[5]、FEMA P1050^[6]、ASCE 7 - 16^[7]中都采用了风险导向地震动参数。

在美国学者研究的基础上,其他国家的学者也在积极研究风险导向地震动参数。Sengara 等^[8]通过风险积分法计算了印度尼西亚地区的风险导向地震动参数,这一结果被印度尼西亚 SNI 1726 - 2012 抗震设计规范所采用。Silva 等^[9]对欧洲地区的风险导向地震动参数研究后发现,在不改变目前可接受的目标倒塌风险的情况下,基于风险导向原理得到的抗震设计图可以使欧洲很多地区的设计地震动强度明显降低,这将使造价大幅减少。陈颀等^[10]通过风险积分法得到了中国大陆地区 50 a 倒塌概率 1% 对应的峰值加速度图。

采用近似解析法评估结构的地震倒塌风险可以提高计算效率,已在结构地震风险分析领域得到了广泛的应用。例如:Ellingwood^[11]假设地震危险性服从极值 II 型的最大值分布,假设结构易损性服从对数正态分布,采用近似解析法对钢结构进行了地震风险评估。Bradley 等^[12]将地震危险性模型从指数形式改进成双曲线形式,采用近似解析法对一个基于新西兰 NZS 3101:95《混凝土结构标准》设计的桥墩进行了风险评估。Li 等^[13]通过增量动力分析确定结构易损性曲线,采用近似解析法对木结构的倒塌风险进行了研究。

目前,大多数的研究是通过风险积分法确定风险导向地震动参数,但是很少有研究采用近似解析法确定风险导向地震动参数。本文作者在前期研究过程中,通过近似解析法得到了适用于全国范围的风险导向峰值地面加速度^[14],通过风险积分法得到了西安地区的风险导向峰值地面加速度^[15]。本文分别采用风险积分法和近似解析法确定西安地区的风险导向地震动参数,进而构建一致风险谱;然后将一致风险谱与一致危险谱进行对比,并将两种方法

得到的一致风险谱进行对比;在此基础上,进行参数影响分析,研究结构地震易损性对数标准差对一致风险谱、风险系数、风险导向地震动参数的比例系数的影响。

1 风险导向地震动参数的确定方法

风险导向地震动参数的确定有两种方法,一种是风险积分法,适用于有概率地震危险性分析结果的具体场地;另一种是近似解析法,适用于抗震设计规范或区划图给出抗震设计用地震动参数的一般场地。

1.1 风险积分法

确定风险导向地震动参数的风险积分法是通过风险积分,即令场地的地震危险性函数与结构的地震易损性函数的卷积等于目标倒塌风险,通过不断迭代得到风险导向地震动参数。风险积分可以表达为以下形式^[3]:

$$v_0 = \int_0^{\infty} H_A(x) dF_R(x) = \int_0^{\infty} H_A(x) f_R(x) dx \quad (1)$$

式中: v_0 为 1 a 的目标倒塌风险,即结构在 1 a 内因遭遇地震作用而发生倒塌的全概率; $H_A(x)$ 为场地的地震危险性函数; x 为地震动强度; $F_R(x)$ 为结构的地震易损性函数,用来表征结构在不同地震作用下发生破坏的条件失效概率; $f_R(x)$ 为结构地震易损性的概率密度函数。通常假设结构的地震易损性服从对数正态分布:

$$F_R(x) = \Phi\left[\frac{\ln(x/m_R)}{\beta}\right] \quad (2)$$

$$f_R(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \ln m_R}{\beta}\right]^2\right\} \quad (3)$$

式中: β 为结构地震易损性的对数标准差; m_R 为结构地震易损性的中位值。

v_0 与 t a 的目标倒塌风险 v_t 可以通过公式进行相互转化:

$$v_t = 1 - (1 - v_0)^t \quad (4)$$

通过概率地震危险性分析得到 $H_A(x)$ 后,给定 v_t 和 β ,联立式(1)、(3)、(4),即可求得 m_R 。

得到 m_R 后,根据已知的巨震(very rare earthquake, VRE)、大震(maximum considered earthquake, MCE)、中震(design basis earthquake, DBE)的条件倒塌概率 p_{dv} 、 p_{dm} 、 p_{dd} ,由式(2)可得风险导向巨震、风险导向大震、风险导向中震的地震动参数 V_R 、 M_R 、 D_R 分别为:

$$V_R = m_R \cdot \exp[\beta \cdot \Phi^{-1}(p_{dv})] \quad (5)$$

$$M_R = m_R \cdot \exp[\beta \cdot \Phi^{-1}(p_{dm})] \quad (6)$$

$$D_R = m_R \cdot \exp[\beta \cdot \Phi^{-1}(p_{dd})] \quad (7)$$

1.2 近似解析法

根据可靠度理论中的概率干涉法^[16],风险积分还可表达为

$$v_0 = \int_0^\infty F_R(x) | dH_A(x) | \quad (8)$$

式中地震危险性函数 $H_A(x)$ 服从极值 II 型的最大值分布^[17]

$$H_A(x) = P[I_M \geq x] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{u}\right)^{-k}\right] \quad (9)$$

式中: I_M (intensity measure) 为地震动参数,本文中的 I_M 为谱加速度 S_a ; u 为尺度参数; k 为形状参数。

$H_A(x)$ 通常采用幂指数函数进行一阶近似^[18]:

$$H_A(x) \approx \left(\frac{x}{u}\right)^{-k} \approx u^k x^{-k} \approx k_0 x^{-k} \quad (10)$$

式中 $k_0 = u^k$, k 和 k_0 可通过公式拟合获得^[12]:

$$k = \frac{\ln(v_D/v_M)}{\ln(M/D)} \quad (11)$$

$$\ln(k_0) = \ln[v_D \cdot (D)^k] =$$

$$\frac{\ln(D) \cdot \ln(v_M) - \ln(M) \cdot \ln(v_D)}{\ln(D/M)} \quad (12)$$

式中: v_D 和 v_M 分别为中震和大震对应的年超越概率; D 和 M 分别为中震和大震对应的地震动参数,为了将风险积分法与近似解析法得到的一致风险谱进行对比,本文分别取 D 和 M 为概率地震危险性分析得到的中震、大震地震动参数。

Cornell^[19]将式(2)代入式(8),推导得到了地震风险的解析表达式:

$$v_0 = H(m_R) \cdot \exp\left(\frac{1}{2}k^2\beta^2\right) \quad (13)$$

联立式(4)、(10) ~ (13)可得

$$m_R = k_0^{\frac{1}{k}} [1 - (1 - v_D)^{\frac{1}{k}}]^{-\frac{1}{k}} \cdot \left[\exp\left(\frac{1}{2}k^2\beta^2\right)\right]^{\frac{1}{k}} \quad (14)$$

求得 m_R 后,根据式(5) ~ (7) 对 V_R 、 M_R 、 D_R 进行决策分析,即可获得具有一致倒塌概率的风险导向地震动参数,本文中的风险导向地震动参数为风险导向谱加速度 S_{aR} 。将不同周期 T 的 V_R 、 M_R 、 D_R 分别连成线便可得到风险导向巨震、风险导向大震、风险导向中震的一致风险谱。

ASCE 7 - 16^[7] 提出的确定风险导向地震动参数的第一种方法是风险系数法,即将 50 a 超越概率为 2% 的地震动参数乘以风险系数得到大震的风险导向地震动参数。GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[20] 中规定巨震、大震的地震动峰值加速度通过中震的地震动峰值加速度乘以一定的系数得到。因此,得到一致风险谱后,本文将通过参数影响分析研究结构地震易损性的对数标准差对风险系数

和风险导向地震动参数的比例系数的影响。

风险系数 R_c 表征的是风险导向大震的地震动参数与具有一致危险性的大震地震动参数的比例关系:

$$R_c = M_R/M \quad (15)$$

风险导向巨震与风险导向中震之间的比例系数 K_1 、风险导向大震与风险导向中震之间的比例系数 K_2 可分别表示为:

$$K_1 = V_R/D_R \quad (16)$$

$$K_2 = M_R/D_R \quad (17)$$

2 一致危险谱与一致风险谱对比分析: 风险积分法

《西安市地震小区划项目技术报告》^[21] 中采用 CPSHA90 算法对 13 个计算控制点进行了地震危险性分析,本文参考王晓磊^[22] 对地震危险性分析的研究,选取其中的 6 个计算控制点 P1、P4、P9、P10、P12、P13,基于蒙特卡洛模拟进行概率地震危险性分析。西安地区用于地震危险性分析的各计算控制点的分布见图 1。

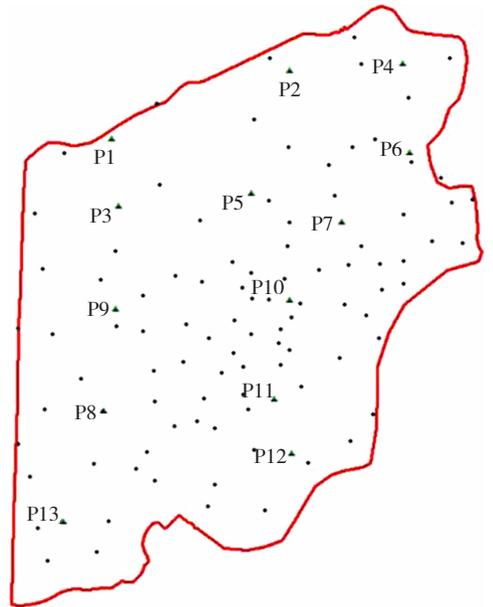


图1 西安地区计算控制点分布^[23]

Fig. 1 Distribution of control points in Xi'an region^[23]

GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[20] 中规定:大震、中震的 50 a 超越概率分别为 2%、10%,巨震的年超越概率为 10^{-4} 。以计算控制点 P13 为例,基于蒙特卡洛模拟与基于 CPSHA90 算法得到的大震、中震一致危险谱对比见图 2。

从图 2 可看出,基于蒙特卡洛模拟得到的一致危险谱总体上低于基于 CPSHA90 算法得到的结果。周期较短时,两种方法得到的一致危险谱相差较小;随着周期增长,基于蒙特卡洛模拟得到的结果逐渐

低于基于 CPSHA90 算法得到的结果。基于蒙特卡洛模拟和基于 CPSHA90 算法得到的大震一致危险谱平均相差 0.028 g, 中震一致危险谱平均相差 0.032 g, 与中震一致危险谱相比, 两种方法得到的大震一致危险谱更为接近。基于蒙特卡洛模拟进行地震危险性分析可以很好地实现地震危险性分解, 为了方便后续对风险导向条件均值谱以及风险导向条件谱进行研究, 本文根据基于蒙特卡洛模拟得到的概率地震危险性分析结果对一致风险谱进行相关研究。

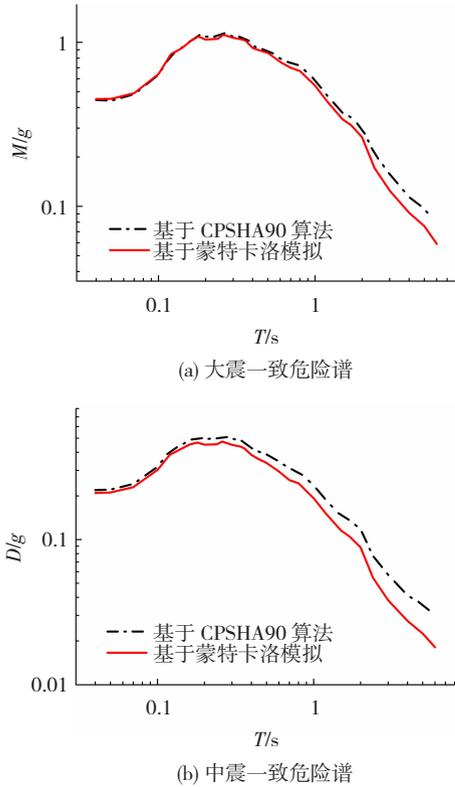


图 2 不同方法一致危险谱对比

Fig. 2 Comparison of uniform hazard spectra of different methods

USGS 提供的 Risk-Targeted Ground Motion Calculator (RTGM Calculator) 取 $v_{ft} = 1.0\%$ 、 $\beta = 0.6$ 、 $p_{dM} = 10\%$, 根据 ASCE7 - 10 中第 21.2.1.2 节的方法 2 计算风险导向地震动参数的值。文献 [15] 通过对西安地区的风险导向地震动参数进行研究, 得到了两种适用于该地区的决策参数, 方案 1 为 $v_{ft} = 1.0\%$ 、 $\beta = 0.4$ 、 $p_{dV} = 50\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 0.2\%$, 方案 2 为 $v_{ft} = 1.0\%$ 、 $\beta = 0.6$ 、 $p_{dV} = 30\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 1.0\%$ [15]。本文分别取这两种方案, 计算西安地区不同计算控制点的一致风险谱。对于方案 2, 以计算控制点 P4、P13 为例, 将本文程序计算得到的大震一致风险谱与通过 RTGM Calculator 得到的大震一致风险谱进行对比, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 本文计算得到的大震一致风险谱与通过 RTGM Calculator 得到的结果一致。对于计算控制点 P4, 两者的最大差值为 0.002 g; 对于计算

控制点 P13, 两者的最大差值为 0.003 g。因此, 基于本文程序计算得到的一致风险谱是可靠的。方案 1 和方案 2 中巨震、大震、中震一致风险谱的对比见图 4。

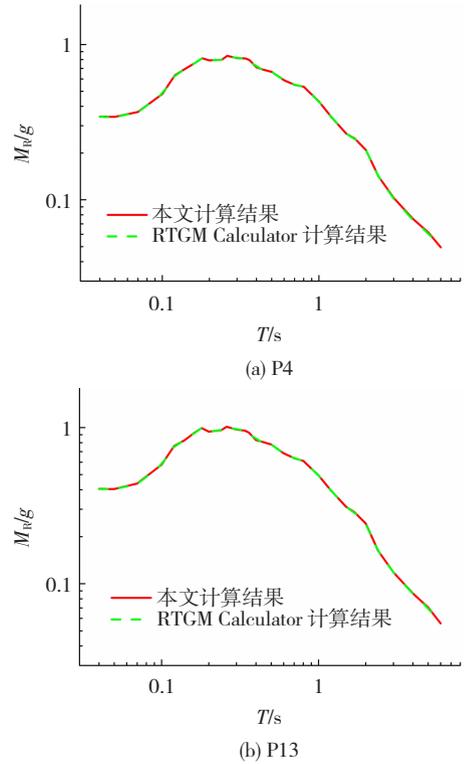


图 3 大震一致风险谱对比

Fig. 3 Comparison of uniform risk spectra of maximum considered earthquake

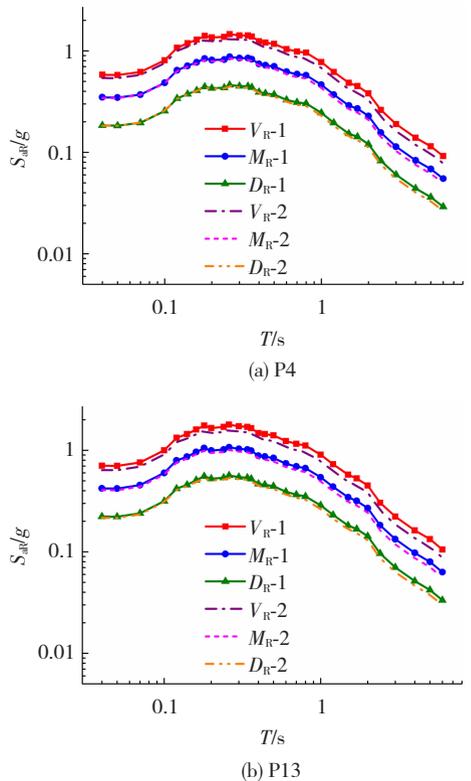


图 4 不同方案一致风险谱对比

Fig. 4 Comparison of uniform risk spectra of different cases

通过图4对比可发现,方案2得到的巨震、大震、中震一致风险谱总体上低于方案1得到的结果,其平均差值逐渐减小,换言之,两种方案得到的巨震一致风险谱的平均差值最大,大震一致风险谱次之,中震一致风险谱最小。对于计算控制点P4,方案2计算得到的巨震、大震、中震一致风险谱比方案1得到的结果分别平均低10.5%、5.1%、4.0%;对于计算控制点P13,方案2计算得到的巨震、大震、中震一致风险谱比方案1得到的结果分别平均低12.4%、7.1%、6.0%。文献[24]通过对地震风险进行研究认为,群体结构的地震损伤风险落在单体结构地震损伤风险的最大值与最小值之间^[24],所以本文认为,方案1适用于单体结构,方案2适用于群体结构。

以计算控制点P13为例,一致危险谱与不同方案中一致风险谱的对比见图5。

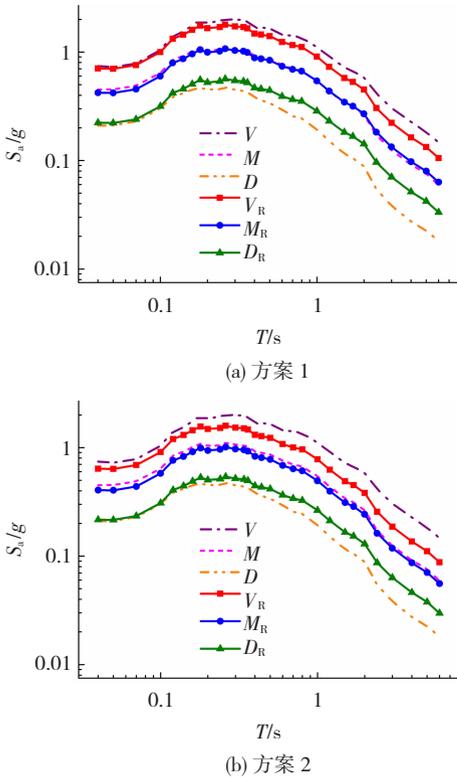


图5 一致危险谱与一致风险谱对比

Fig.5 Comparison of uniform hazard spectra and uniform risk spectra

由图5可见,对于巨震、中震一致风险谱,随着周期增长,其相对于巨震、中震一致危险谱分别逐渐变小、变大,而大震一致风险谱与大震一致危险谱较为接近。对于方案1,巨震、大震一致风险谱分别比相应的一致危险谱平均低14.8%、1.7%,中震一致风险谱比中震一致危险谱平均高35.4%;对于方案2,巨震、大震一致风险谱分别比相应的一致危险谱平均低25.2%、8.8%,中震一致风险谱比中震一致

危险谱平均高26.6%。巨震一致风险谱低于其一致危险谱,这说明将万年一遇的地震动参数作为巨震可能偏于保守。中震一致风险谱高于其一致危险谱,这表明基于中震一致危险谱进行抗震设计的结构在地震作用下的50 a倒塌概率高于1%。

3 两种方法得到的一致风险谱对比分析

本节以计算控制点P13为例,将通过风险积分法与通过近似解析法得到的一致风险谱进行对比分析,探讨两种方法所得结果的差异。确定式(10)所示地震危险性解析表达式中的 k 和 k_0 时,大震、中震的地震动参数分别取基于蒙特卡洛模拟所得年超越概率曲线上对应50 a超越概率2%、10%的地震动强度。基于蒙特卡洛模拟得到的年超越概率曲线与基于地震危险性解析表达式得到的年超越概率曲线对比见图6。

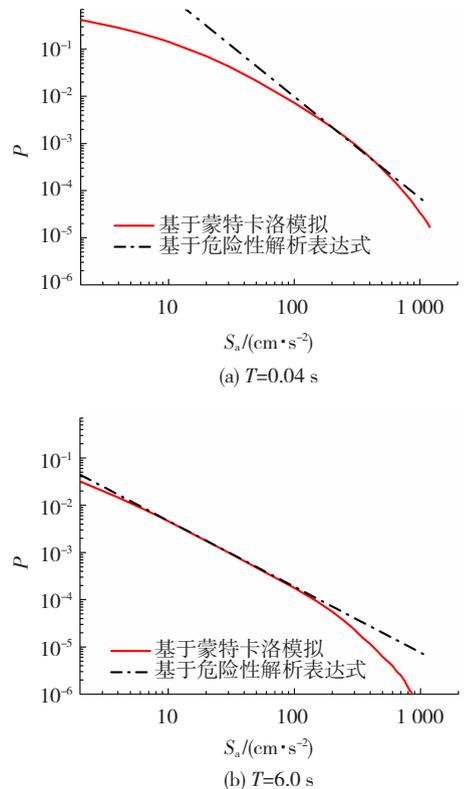
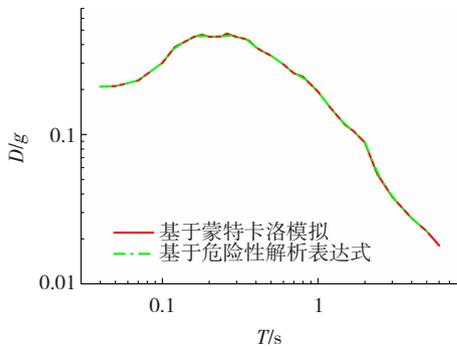


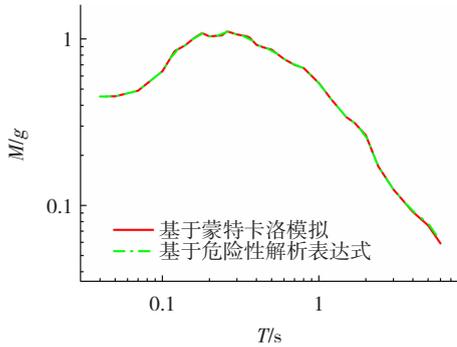
图6 年超越概率曲线对比

Fig.6 Comparison of exceeding probability curves of different methods

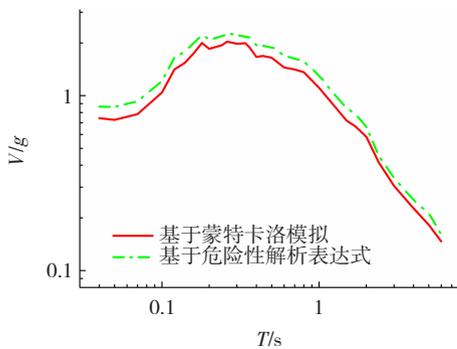
从图6可看出,基于危险性解析表达式得到的年超越概率曲线在双对数坐标下近似直线,其与基于蒙特卡洛模拟得到的年超越概率曲线在50 a超越概率为2%~10%附近时非常接近,远离该范围时两种方法所得结果的差距逐渐增大。基于蒙特卡洛模拟与基于危险性解析表达式所得的中震、大震、巨震一致危险谱对比见图7。



(a) 中震一致危险谱



(b) 大震一致危险谱



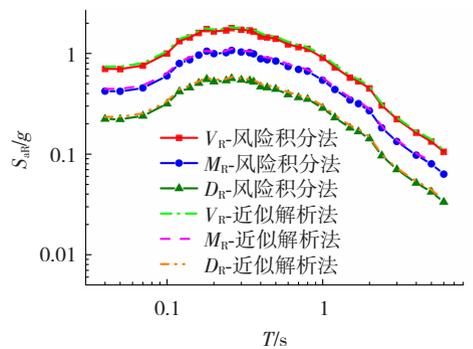
(c) 巨震一致危险谱

图 7 一致危险谱对比

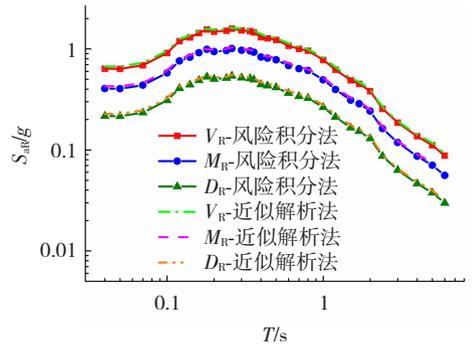
Fig. 7 Comparison of uniform hazard spectra

由于地震危险性解析表达式中的 k 和 k_0 是根据基于蒙特卡洛模拟得到的中震和大震地震动参数确定的,所以图 7 中两种方法得到的中震、大震一致危险谱是非常接近的。对比图 6(a)、(b) 可发现,年超越概率取 10^{-4} , $T = 0.04$ s 时两种方法得到的 S_a 相差较大, $T = 6.0$ s 时两种方法得到的 S_a 相差较小。因此,对于图 7 中的巨震一致危险谱,与周期较短时相比,周期较长时,基于危险性解析表达式得到的结果比基于蒙特卡洛模拟得到的结果高得相对小一些。2 s 之前,基于危险性解析表达式得到的巨震一致风险谱比基于蒙特卡洛模拟得到的结果平均高 15.4%, 2 ~ 6 s 时平均高 12.0%。

将通过风险积分法与通过近似解析法得到的一致风险谱进行对比,见图 8。



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 8 不同方法一致风险谱对比

Fig. 8 Comparison of uniform risk spectra of different methods

通过图 8 对比可发现,各方案不同方法得到的一致风险谱差别都不大。方案 1 中,通过近似解析法得到的巨震、大震、中震一致风险谱均比通过风险积分法得到的结果平均高 4.8%, 方案 2 中平均高 4.5%。结合图 6 ~ 8 可看出,虽然基于蒙特卡洛模拟与基于地震危险性解析表达式得到的年超越概率曲线在远离 50 a 超越概率 2% ~ 10% 时差距较大,但是基于二者得到的一致风险谱的差距在 5% 以内,这说明基于两种方式得到的年超越概率曲线的差异对基于一致风险谱的抗震设计的影响并不是很大。

上述通过风险积分法构建一致风险谱时,地震危险性函数是基于蒙特卡洛模拟进行概率地震危险性分析得到的;通过近似解析法构建一致风险谱时,地震危险性函数是基于地震危险性解析表达式得到的。因此,不能确定图 8 中两种方法所得结果的差异是由于地震危险性函数不同造成的,还是由于方法不同造成的。为了使两种方法所采用的地震危险性函数保持一致,接下来均基于地震危险性解析表达式确定地震危险性函数,然后对两种方法得到的一致风险谱进行对比,见图 9。

图 9 中通过风险积分法与通过近似解析法得到的一致风险谱非常接近,方案 1、方案 2 中两种方法所得各一致风险谱的平均相对差值分别相同,均为

0.1%、0.2%，从而验证了场地的地震危险性函数与结构的地震易损性函数相同时，通过风险积分法与通过近似解析法构建的一致风险谱是相同的。结合对图8的分析可以发现：对于不适合用风险积分法构建一致风险谱的场地，例如没有场地相关概率地震危险性分析结果的场地，如果给定的中震和大震地震动参数是与该场地相一致的，基于近似解析法得到的一致风险谱是合理的。

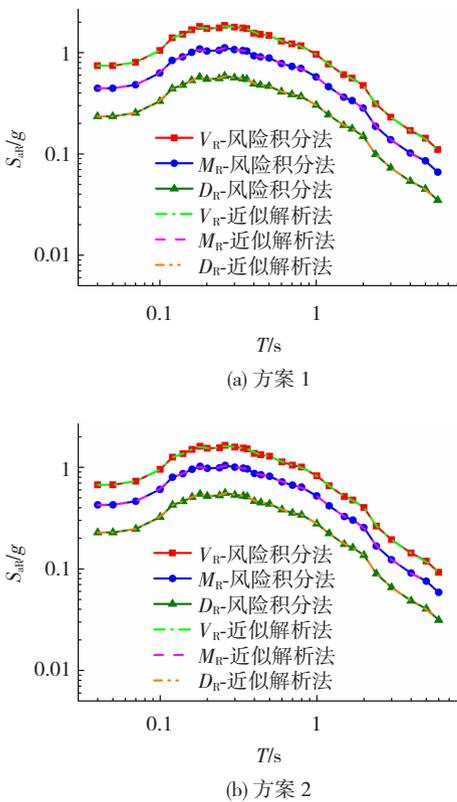


图9 不同方法一致风险谱对比验证

Fig. 9 Verification of uniform risk spectra of different methods

4 参数影响分析

本节以计算控制点 P13 的方案 1 为例， β 分别取 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 进行参数影响分析， β 对风险积分法构建的一致风险谱的影响规律见图 10。

从图 10 参数影响分析可发现： $\beta \leq 0.7$ 时，对中震一致风险谱的影响较大， $\beta > 0.7$ 时，对巨震一致风险谱的影响较大， β 的变化对大震一致风险谱的影响较小。周期 T 相同时，随着 β 增大，巨震一致风险谱的谱值逐渐增大， β 越大，对其影响越大；大震一致风险谱的谱值有增有减但变化不大；中震一致风险谱的谱值逐渐减小， β 越大，对其影响越小。随着 T 增长， β 对巨震一致风险谱的影响逐渐减小，对大震一致风险谱的影响变化不大，对中震一致风险谱的影响略微增大。

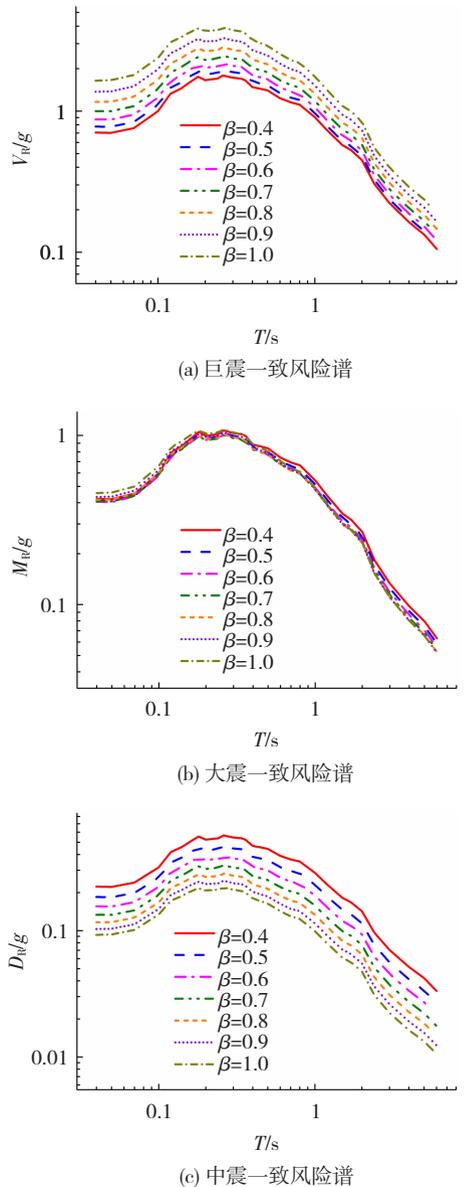


图10 β 对一致风险谱的参数影响分析

Fig. 10 Effect of β on uniform risk spectra

在以上研究基础上，进一步研究了 β 对 R_c 和风险导向地震动参数的比例系数 K 的影响规律，见图 11。

从图 11(a) 可以看出， $\beta < 0.7$ 时， β 对较长周期的 R_c 影响大， R_c 随着 β 增大而减小，随着 T 增长呈增大趋势； $\beta \geq 0.7$ 时， β 对较短周期的 R_c 影响大， R_c 总体上随着 β 增大而增大，随着 T 增长呈减小趋势。

由式(5) ~ (7)、(16) ~ (17) 可知， K_1 、 K_2 与 β 和相应的条件倒塌概率有关，因此，对于同一方案， β 相同时，一致风险谱上不同周期计算得到的 K_1 和 K_2 均相同。从图 11(b) 可以看出，随着 β 不断增大， K_1 和 K_2 均不断增大，但是 K_1 比 K_2 增长得快一些，换言之， β 对 K_1 的影响大于 β 对 K_2 的影响。随着 β 不断增大， K_1 、 K_2 的增长率均变化不大，其平均增长率分别为 33.4%、17.4%。

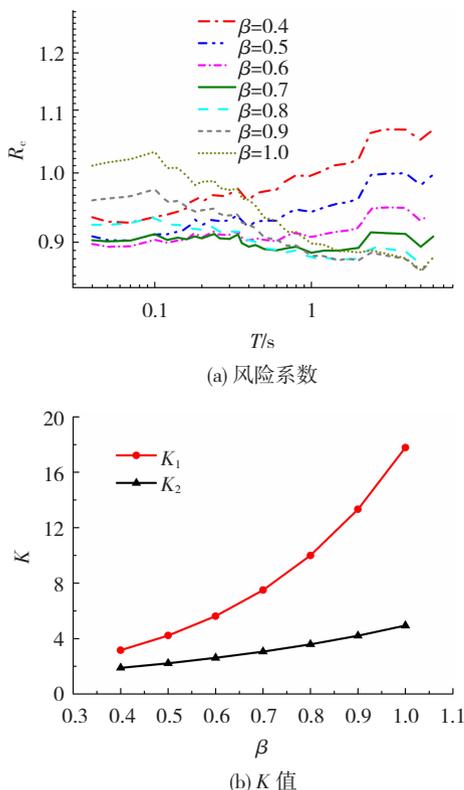


图 11 β 对 R_c 和 K 的参数影响分析

Fig. 11 Effect of β on R_c and K

本文的参数影响分析较为粗略,后续需要对不同结构形式的地震易损性以及区域群体结构的地震易损性进行深入研究,如何基于一致风险谱进行抗震设计或是对既有结构进行评估也值得进一步研究。

5 结 论

目前,很多国家都已经采用一致风险谱指导抗震设计,中国现行抗震设计规范仍然采用的是一致危险谱。本文分别采用风险积分法和近似解析法构建了西安地区的一致风险谱,并将一致风险谱与一致危险谱进行了对比,同时也对两种方法得到的一致风险谱进行了对比,在此基础上进行了参数影响分析。基于上述研究,得出以下结论:

1) 本文选用两种方案构建一致风险谱,方案 1 取 $v_{ft} = 1.0\%$ 、 $\beta = 0.4$ 、 $p_{dV} = 50\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 0.2\%$,适用于单体结构;方案 2 取 $v_{ft} = 1.0\%$ 、 $\beta = 0.6$ 、 $p_{dV} = 30\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 1.0\%$,适用于群体结构。通过一致风险谱与一致危险谱的对比可以发现,西安地区巨震、大震、中震一致危险谱对应的 50 a 目标倒塌风险分别低于 1%、接近 1%、高于 1%。

2) 本文同时采用危险性解析表达式确定风险积分法和近似解析法中的地震危险性函数,然后对两种方法得到的一致风险谱进行对比分析,结果显

示:方案 1、方案 2 中两种方法得到的一致风险谱的平均相对差值分别为 0.1%、0.2%,从而验证了两种方法得到的一致风险谱的差异是由于地震危险性函数不同造成的,而不是方法不同造成的。这说明给定的中震和大震地震动参数与场地的地震危险性一致时,通过近似解析法构建一致风险谱是合理的。

3) β 对大震一致风险谱的影响较小, $\beta \leq 0.7$ 时,对中震一致风险谱的影响比巨震一致风险谱的影响大, $\beta > 0.7$ 时,对巨震一致风险谱的影响比中震一致风险谱的影响大。周期 T 相同时,巨震一致风险谱的谱值随着 β 增大逐渐增大, β 越大对其影响越大;大震一致风险谱的谱值随着 β 增大变化不大;中震一致风险谱的谱值随着 β 增大逐渐减小, β 越大对其影响越小。 β 对巨震、大震、中震一致风险谱的影响分别随着 T 增长逐渐减小、变化不大、略微增大。

4) $\beta < 0.7$ 时,对较长周期的 R_c 影响大; $\beta \geq 0.7$ 时,对较短周期的 R_c 影响大。 β 对 K_1 的影响比 K_2 的影响大, K_1 、 K_2 的增长率随着 β 的不断增大变化不大,其平均值分别为 33.4%、17.4%。

参 考 文 献

- [1] SHI Wei, LU Xinzhen, YE Lieping. Uniform-risk-targeted seismic design for collapse safety of building structures[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55 (6): 1485. DOI: 10.1007/s11431-012-4808-7
- [2] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Quantification of building seismic performance factors: FEMA P695 [R]. Redwood City, CA: Applied Technology Council, 2009
- [3] LUCO N, ELLINGWOOD B R, HAMBURGER R O, et al. Risk-targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States[C]//SEAOC 2007 Convention Proceedings. Sacramento, CA: Structural Engineers Association of California, 2007:6
- [4] Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures: FEMA P750[R]. Washington DC: FEMA, 2009
- [5] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-10 [S]. New York: Structural Engineering Institute, ASCE, 2010
- [6] Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures: FEMA P1050[R]. Washington DC: FEMA, 2015
- [7] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-16 [S]. New York: Structural Engineering Institute, ASCE, 2016
- [8] SENGARA I W, SIDHI I D, MULIA A, et al. Development of risk coefficient for input to new Indonesian seismic building codes[J]. Journal of Engineering Technology, 2016, 48 (1): 61. DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2016.48.1.5

- [9] SILVA V, CROWLEY H, BAZZURRO P. Advances on risk-targeted hazard estimation within the European context [C]// Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12). Vancouver: [s. n.], 2015:1
- [10] 陈颀, 高孟潭. 中国大陆地区一般建设工程抗地震倒塌风险研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1):27
CHEN Kun, GAO Mengtan. Controlling seismic collapse risk of general construction projects in China mainland [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1):27. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2015.01.003
- [11] ELLINGWOOD B R. Earthquake risk assessment of building structures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 74(3):256. DOI: 10.1016/S0951-8320(01)00105-3
- [12] BRADLEY B A, DHAKAL R P, CUBRINOVSKI M, et al. Improved seismic hazard model with application to probabilistic seismic demand analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 36(14):2225. DOI: 10.1002/eqe.727
- [13] LI Y, YIN Y J, ELLINGWOOD B R, et al. Uniform hazard versus uniform risk bases for performance-based earthquake engineering of light-frame wood construction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(11):1215. DOI: 10.1002/eqe.989
- [14] 吕大刚, 周洲, 王丛, 等. 考虑巨震的四级地震设防水平一致风险导向定义与决策分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(11):47
LÜ Dagang, ZHOU Zhou, WANG Cong, et al. Uniform risk-targeted definitions and decision-making of four seismic design levels considering very rare earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(11):47
- [15] 王丛, 吕大刚. 西安地区风险导向地震动参数的确定[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(10):60
WANG Cong, LÜ Dagang. Determination of risk-targeted ground motion parameters in Xi'an region [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(10):60. DOI: 10.11918/202004101
- [16] MELCHERS R E, BECK A T. Structural reliability analysis and prediction[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2018:14
- [17] CORNELL C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5):1593
- [18] Federal Emergency Management Agency (FEMA). Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings: FEMA 350[R]. Washington DC: FEMA, 2000
- [19] CORNELL C A. Risk-based structural design[C]// Proceedings of Symposium on Risk Analysis. Michigan: University of Michigan, 1994:11
- [20] 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015
- [21] 西安大地地震工程勘察中心. 西安市地震小区划项目技术报告[R]. 西安: 西安市地震局, 2011
Xi'an Earthquake Engineering Investigation Center. Project technology report of Xi'an earthquake division scope[R]. Xi'an: Xi'an Earthquake Bureau, 2011
- [22] 王晓磊. 基于场地危险性和目标谱的核电安全壳概率地震风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018:28
WANG Xiaolei. Seismic probabilistic risk analysis for nuclear power plant containments based on site-specific hazard and target spectra [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018:28
- [23] 贾晓琳. 基于随机有限断层模型的西安地区概率地震危险性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016:59
JIA Xiaolin. Probabilistic seismic hazard analysis for Xi'an region based on stochastic finite fault model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016:59
- [24] 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, 2012:165
YU Xiaohui. Probabilistic seismic fragility and risk analysis of reinforced concrete frame structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012:165

(编辑 赵丽莹)