

DOI:10.11918/202004101

西安地区风险导向地震动参数的确定

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: 为实现一致倒塌风险, 对风险导向地震动参数进行了研究. 首先, 基于 ArcGIS Engine 平台, 采用离散算法对西安地区的计算控制点进行了概率地震危险性分析; 然后, 根据地震危险性分析得到的年超越概率曲线, 考虑结构的地震易损性, 基于地震动决策参数已有的研究成果, 通过风险积分得到了各计算控制点的风险导向巨震、大震、中震的地震动参数 PGA_{RV} 、 PGA_{RM} 、 PGA_{RD} , 并计算了风险系数 R_c (风险导向大震的地震动强度与大震对应地震动强度之比) 以及风险导向巨震、风险导向大震与风险导向中震地震动参数的比例关系 K_1 、 K_2 ; 最后, 分别取结构易损性对数标准差 β_R 为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0, 通过参数影响分析研究了 β_R 对 PGA_{RM} 、 R_c 、 K_1 和 K_2 的影响. 研究结果表明: 倒塌概率并不会随着极罕遇地震对应地震动强度的增加而增加; PGA_{RM} 、 R_c 、 K_1 和 K_2 都随着 β_R 的增加而增加; β_R 越大, 对 PGA_{RM} 和 R_c 的影响越大, 对 K_1 和 K_2 的影响不变; K_1 和 K_2 比 PGA_{RM} 和 R_c 对 β_R 敏感, K_1 对 β_R 最敏感. 本文得到的西安地区的风险导向地震动参数可以为抗震设计提供参考.

关键词: 风险导向地震动参数; 风险积分; 风险系数; 易损性对数标准差; 参数影响分析

中图分类号: TU312

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)10-0052-09

Determination of risk-targeted ground motion parameters 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 achieve consistent collapse risk, risk-targeted ground motion parameters were investigated. First, based on the ArcGIS Engine software, a discrete algorithm was used to analyze the probability of seismic hazard in Xi'an region. Then, by considering the seismic fragility of the structure, the risk-targeted ground motion parameters of very rare earthquake, maximum considered earthquake, and design basis earthquake for each control point were obtained by risk integral based on the annual exceeding probability curves obtained from seismic hazard analysis and the ground motion decision parameters obtained from existing research results. The risk-targeted ground motion parameters were denoted as PGA_{RV} , PGA_{RM} , and PGA_{RD} , respectively. The relation between the risk coefficient R_c (defined as the ratio of PGA_{RM} to the ground motion intensity corresponding to maximum considered earthquake) and K_1 (defined as the ratio of PGA_{RV} to PGA_{RD}) and K_2 (defined as the ratio of PGA_{RM} to PGA_{RD}) were calculated. Finally, based on the parameter effect analysis, the effect of β_R (i. e., logarithmic standard deviation of structural fragility) on PGA_{RM} , R_c , K_1 , and K_2 was investigated with its value chosen to be 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1.0, respectively. Results show that the collapse probability did not increase with the increase of the ground motion intensity corresponding to very rare earthquake. Parameters PGA_{RM} , R_c , K_1 , and K_2 all increased with the increase of β_R . The larger β_R was, the greater the effect on PGA_{RM} and R_c was, while the effect on K_1 and K_2 remained unchanged with increasing β_R . Compared with PGA_{RM} and R_c , K_1 and K_2 were more sensitive to β_R , and K_1 was the most sensitive to β_R among all the parameters. The risk-targeted ground motion parameters obtained in Xi'an region can provide references for seismic design.

Keywords: risk-targeted ground motion parameters; risk integral; risk coefficient; logarithmic standard deviation of fragility; parameter effect analysis

收稿日期: 2020-04-17

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

当前, 中国以 50 a 超越概率 10% 的地震危险性水平进行抗震设防, 是一种基于“一致危险(uniform hazard)”的抗震设防思想. 由于地震危险性存在地区差异, 工程结构抗地震倒塌能力也存在不确定性,

因此按一致危险性设防的地震动参数不一定能够保证抗震设防水平具有一致的倒塌概率(即倒塌风险),从而导致各地的地震风险水平差异较大。因此,抗震设防水准的决策应该从只考虑地震危险性的“一致危险”原则向同时考虑地震危险性区域差异和工程结构抗倒塌能力不确定性的“一致风险(uniform risk)”原则转变^[1-2]。

2007 年, Luco 等^[3]提出了“风险导向地震动(risk-targeted ground motion, RTGM)”。2009 年, FEMA P750^[4]引入了风险导向地震动的定义,并编制了相应的区划图,规定以 50 a 倒塌概率 1% 进行抗震设防,从而完成了抗震设防从“一致危险”向“一致风险”的转换。2010 年, ASCE/SEI 7-10^[5]进行修订时也采用了风险导向地震动,并将地震易损性的对数标准差从 0.8 降为了 0.6。2015 年, FEMA P1050^[6]对风险导向最大考虑地震区划图进行了进一步的修订。印度尼西亚于 2010 年完成了风险导向地震动参数区划图的编制,并于 2012 年基于一致风险设计思想对抗震设计规范进行了修订^[7-8]。此外, 法国^[9-10]、加拿大^[11]、意大利^[12]、罗马尼亚^[13]、沙特阿拉伯^[14]等国家的学者也对风险导向地震动进行了大量研究。

中国在风险导向地震动方面的研究相对比较薄弱。张晓梅^[15]对基于抗倒塌设防目标的设计地震动区划进行了研究,认为以防倒塌为设防目标的地震动参数是更为合理的用于抗震设计的地震动参数。陈鲲鹏等^[16-17]基于 GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》以及 ATC-63 对一般工程结构抗倒塌能力不确定性的研究成果,初步获得了中国具有一致倒塌风险的峰值地面加速度图。

中国 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[18]仅对少数重要的建筑结构进行抗倒塌计算, GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[19]部分实现了抗倒塌的设防目标,但是还未能提供设计用的风险导向地震动参数。

本文作者在文献[1]中提出了风险导向地震设防水平决策的解析方法,并计算了中国巨震、大震、中震、小震的风险导向地震动参数 PGA 值。但是,通过解析方法得到的风险导向地震动参数是全国范围的,并不适用于具体场地的地震动设防水平决策。本文基于场地相关的概率地震危险性分析,采用风险积分方法对风险导向地震设防水平进行决策分析,以为具体场地提供抗震设计用风险导向地震动参数。为此,本文以西安地区为例,将地震危险性函数与结构易损性函数进行耦合,采用风险积分方法得到西安地区 6 个计算控制点的风险导向地震动参

数、风险系数以及风险导向的巨震和大震与中震地震动参数的比值,并研究结构易损性对数标准差对计算结果的影响。

1 基于场地相关概率地震危险性分析的风险导向地震动参数确定方法

根据结构可靠度理论的概率干涉法^[20],风险积分有两种表达形式。第一种表达式为

$$v_0 = \int_0^\infty F_R(x) |dH_A(x)|, \quad (1)$$

式中: v_0 为年目标倒塌风险; $H_A(x)$ 为地震危险性函数,通过概率地震危险性分析得到; x 为地震动强度; $F_R(x)$ 为结构的地震易损性函数,通常假设结构的地震易损性服从对数正态分布:

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

式中: m_R 为地震易损性的中位值; β_R 为地震易损性的对数标准差,综合反映地震动记录之间的差异以及建造质量、材料特性、非结构构件等差异造成的建筑结构抗倒塌能力的不确定性。

v_0 与设计基准期 T a 内的目标倒塌风险 v_{IT} 可通过下式进行相互转化:

$$v_{\text{IT}} = 1 - (1 - v_0)^T. \quad (3)$$

对于没有场地相关概率地震危险性结果的一般场地,本文作者根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》中提供的不同抗震设防烈度的地震动参数,在文献[1]中提出了基于式(1)~(3)确定风险导向地震动参数的决策方法。

对于有场地相关概率地震危险性分析结果的工程场地,本文采用风险积分的第二种表达式确定风险导向地震动参数:

$$v_0 = \int_0^\infty H_A(x) dF_R(x) = \int_0^\infty H_A(x) f_R(x) dx, \quad (4)$$

式中 $f_R(x)$ 为结构地震易损性的概率密度函数,对于对数正态分布, $f_R(x)$ 为

$$f_R(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_R x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln x - \ln m_R}{\beta_R}\right]^2\right\}, \quad (5)$$

若已知 $H_A(x)$, 在给定 v_{IT} 和 β_R 的情况下,根据式(3)~(5),求解式(4)所示的积分方程,即可得到 m_R 。

得到 m_R 之后,若分别给定巨震(very rare earthquake, VRE)、大震(maximum considered earthquake, MCE)和中震(design basis earthquake, DBE)的目标条件倒塌概率 p_{dv} 、 p_{dm} 和 p_{db} ,则根据式(2),即可得到各级设防水平的风险导向地震动参数:

$$\text{PGA}_{\text{RV}} = m_R \exp[\beta_R \Phi^{-1}(p_{\text{dv}})], \quad (6)$$

$$PGA_{RM} = m_R \exp[\beta_R \Phi^{-1}(p_{dM})], \quad (7)$$

$$PGA_{RD} = m_R \exp[\beta_R \Phi^{-1}(p_{dD})]. \quad (8)$$

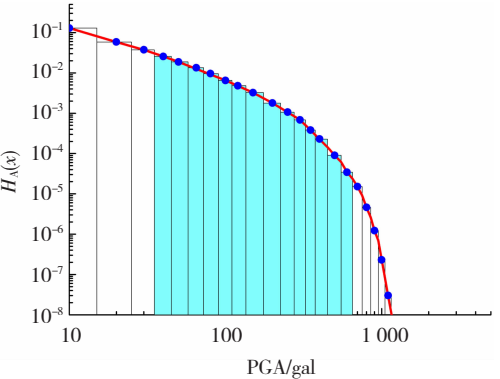
式中 PGA_{RV} 、 PGA_{RM} 、 PGA_{RD} 分别为巨震、大震、中震的风险导向地震动参数。

若根据本文作者在文献[1]的建议,取 $p_{dV} = 50\%$,则根据式(6)可知 $PGA_{RV} = m_R$ 。

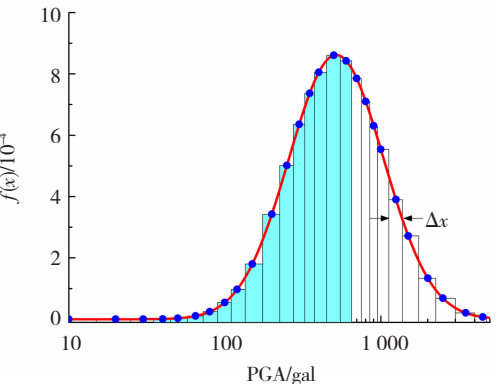
对于给定的 $H_A(x)$,式(4)很难直接进行求解,本文采用数值积分方法予以求解

$$v_0 = \sum_{x_i=0}^{\infty} H(x_i) f(x_i) \Delta x_i. \quad (9)$$

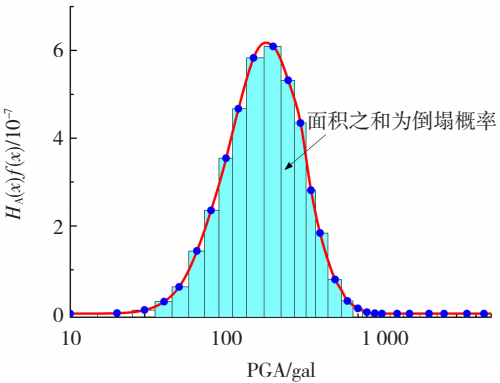
风险积分的数值积分求解过程示意图 1.



(a) 场地相关概率地震危险性曲线



(b) 结构地震易损性的概率密度曲线



(c) 风险积分的失效密度曲线

图 1 风险积分的数值积分分解过程示意

Fig. 1 Numerical integration deaggregation process of risk integral

由图 1 可知,风险积分同时考虑了地震危险性

以及结构易损性,最终通过求和(或积分)得到倒塌概率.确定风险导向地震动参数的流程图见图 2.

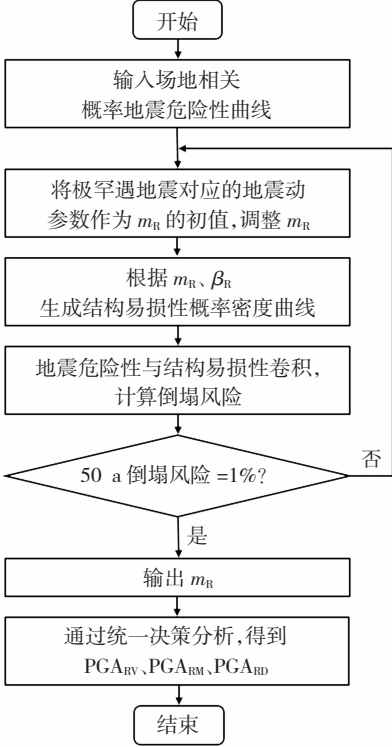


图 2 确定风险导向地震动参数的流程图

Fig. 2 Flowchart for determination of risk-targeted ground motion parameters

参照 ASCE/SEI 7-10,本文将 PGA_{RM} 与相应的非风险导向大震地震动参数 PGA_M 之比定义为风险系数 R_c :

$$R_c = PGA_{RM}/PGA_M. \quad (10)$$

参照 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》,本文将 PGA_{RV} 和 PGA_{RM} 分别与 PGA_{RD} 的比值定义为比例关系 K_1 和 K_2 :

$$K_1 = PGA_{RV}/PGA_{RD}, \quad (11)$$

$$K_2 = PGA_{RM}/PGA_{RD}. \quad (12)$$

2 西安地区的概率地震危险性分析

概率地震危险性分析是确定风险导向地震动参数的过程中至关重要的一步,在本课题组庞健^[21]、吕大刚等^[22]对西安地区的概率地震危险性分析研究的基础上,基于庞健开发的 ArcGIS Engine 概率地震危险性分析平台,采用离散算法对场点的概率地震危险性进行分析。

《西安市地震小区划项目技术报告》^[23](以下简称“西安报告”)提供的各地震带的 4 级以上地震年平均发生率 λ_0 、震级-频度关系中的 b 值以及震级上限 m_{uz} 见表 1。

将地震统计区的震级域离散为多个震级档,各地震统计区的震级分布 $P(m_j)$ 为

$P(m_j) = \frac{2\exp[-b\ln10(m_j - m_0)]}{1 - \exp[-b\ln10(m_{uz} - m_0)]} \sinh\left(\frac{b\ln10}{2}\Delta m\right), (13)$

式中： m_j 为各震级档的中心值; m_0 为起算震级,取 4 级; Δm 为各震级档的震级间隔; $\sinh$ 为双曲正弦函数.

表 1 地震带年平均发生率、 b 值和震级上限^[23]

Tab.1 Annual mean occurrence rate, b value, and upper magnitude limit for each seismic belt^[23]

编号	地震带	统计时段	$\lambda_0/\text{个}$	b	m_{uz}
A	汾渭地震带	1 500 ~ 2 010	1.97	0.724	8.5
B	六盘山－祁连山地震带	1 900 ~ 2 010	1.88	0.755	8.5
C	龙门山地震带	1 573 ~ 2 010 1 879 ~ 2 010	3.87	0.813	8.0
D	长江中游地震带	1 900 ~ 2 010	1.11	0.783	7.0
E	华北平原地震带	1 500 ~ 2 010	2.49	0.809	8.0

各震级档的地震年平均发生率 λ_{m_j} 为

$$\lambda_{m_j} = P(m_j)\lambda_0, (14)$$

λ_{m_j} 的计算结果见表 2.

表 2 各震级档地震年平均发生率

Tab.2 Annual mean occurrence rate for each magnitude interval

地震带	$\lambda_{m_j}/\text{个}$						
	4.0 ~ 5.4	5.5 ~ 5.9	6.0 ~ 6.4	6.5 ~ 6.9	7.0 ~ 7.4	≥ 7.5	
A	1.780 1	0.078 7	0.034 2	0.014 9	0.006 5	0.004 7	
B	1.715 8	0.069 5	0.029 1	0.012 2	0.005 1	0.003 5	
C	3.590 5	0.123 1	0.048 3	0.018 9	0.007 4	0.003 4	
D	1.025 7	0.038 3	0.015 6	0.006 3	0.000 0	0.000 0	
E	2.307 9	0.080 1	0.031 5	0.012 4	0.004 9	0.002 2	

西安市地震局提供的各潜在震源区的地震活动性参数见表 3.

表 3 主要潜在震源区的地震活动性参数^[23]

Tab.3 Seismic activity parameters for major potential seismic source zones^[23]

编号	潜源名称	所在地震带	$\lambda_{m_j}/\text{个}$						震级上限	方向性函数			
			4.0 ~ 5.4	5.5 ~ 5.9	6.0 ~ 6.4	6.5 ~ 6.9	7.0 ~ 7.4	≥ 7.5		$\theta_1/(\text{°})$	P_1	$\theta_2/(\text{°})$	P_2
1	凤翔－岐山	汾渭地震带	0.022 4	0.029 2	0.026 5	0.019 7	0.000 0	0.000 0	7.0	130	1.0		
2	宝鸡		0.020 7	0.022 0	0.033 1	0.050 9	0.099 9	0.000 0	7.5	170	1.0		
3	乾县－礼泉		0.025 8	0.027 5	0.029 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	30	1.0		
4	咸阳		0.021 4	0.022 8	0.034 5	0.026 0	0.025 8	0.000 0	7.5	10	1.0		
5	户县		0.021 6	0.023 0	0.034 6	0.053 2	0.010 4	0.072 4	8.0	0	1.0		
6	西安		0.009 0	0.009 6	0.014 4	0.022 1	0.043 4	0.000 0	7.5	60	1.0		
7	蓝田		0.013 2	0.014 1	0.021 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	60	1.0		
8	卢氏		0.019 1	0.020 4	0.030 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	120	1.0		
9	三原－高陵		0.021 4	0.022 8	0.024 5	0.021 2	0.000 0	0.000 0	7.0	0	1.0		
10	渭南－华县		0.035 0	0.037 3	0.056 1	0.086 3	0.084 7	0.031 0	8.5	10	1.0		
11	蒲城		0.031 2	0.033 3	0.035 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	30	0.7	90	0.3
12	大荔		0.026 4	0.028 1	0.042 3	0.051 3	0.058 5	0.000 0	7.5	25	0.7	60	0.3
13	三门峡		0.021 0	0.022 4	0.033 7	0.051 8	0.000 0	0.000 0	7.0	75	1.0		
14	运城		0.041 9	0.044 6	0.067 1	0.050 2	0.012 6	0.000 0	7.5	75	1.0		
15	韩城		0.023 5	0.025 0	0.037 6	0.051 3	0.111 7	0.000 0	7.5	60	1.0		
16	侯马		0.046 1	0.049 0	0.046 1	0.046 5	0.000 0	0.000 0	7.0	90	1.0		
17	蒲县		0.014 7	0.033 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.0	120	1.0		
18	陇县－千阳	六盘山－祁连山地震带	0.033 4	0.043 6	0.039 6	0.029 4	0.032 1	0.000 0	7.5	55	1.0		
19	清水	龙门山地震带	0.029 2	0.029 4	0.027 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	120	0.7	30	0.3
20	凤阁岭		0.020 7	0.022 0	0.033 4	0.051 0	0.102 1	0.000 0	7.5	150	1.0		
21	洛南	华北平原地震带	0.019 1	0.020 4	0.030 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	120	1.0		
22	栾川		0.014 7	0.033 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.0	120	1.0		
23	商南		0.014 7	0.033 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.0	120	1.0		
24	十堰	长江中游地震带	0.014 7	0.033 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.0	120	1.0		
25	白河		0.014 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	5.5	20	1.0		
26	平利		0.014 9	0.039 5	0.112 5	0.433 6	0.000 0	0.000 0	7.0	115	1.0		
27	石泉－汉阴		0.014 7	0.033 5	0.033 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	120	1.0		
28	汉中		0.008 8	0.020 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.0	70	1.0		
29	镇巴		0.015 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	5.5	15	1.0		
30	宁强		0.008 8	0.020 4	0.027 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	6.5	80	1.0		

考虑到地震动加速度的震级饱和与距离饱和,地震动参数 X 采用以下衰减关系模型:

$$\lg(X) = c_1 + c_2M + c_3M^2 + c_4\lg(R + c_5\exp(c_6M)) + \varepsilon,$$

(15)

式中: M 为面波震级; R 为震中距; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6

$$H_A(x) = P(X \geq x) = 1 - \exp\left[-\sum_{k=1}^{N_z}\sum_{j=1}^{N_m}\sum_{i=1}^{N_{ks}}\iiint P(X \geq x | E(m_j, r_{(y,z)_{k_i}}, \theta)) f_{\theta} \lambda_{k,m_j} \frac{f_{k_i,m_j}}{S_{k_i}} dy dz d\theta\right].$$

(16)

式中: N_z 为地震统计区的个数; N_m 为震级档的个数; N_{ks} 为第 k 个地震统计区内潜在震源区的个数; $P(X \geq x | E(m_j, r_{(y,z)_{k_i}}, \theta))$ 为第 k 个地震统计区内 (y, z) 位置处发生一次第 m_j 档地震, 工程场点处给定的 x 被超越的条件概率; f_{θ} 为方向性函数; λ_{k,m_j} 为第 k 个地震统计区内第 m_j 档地震的年平均发生率; f_{k_i,m_j} 为空间分布函数, 表示第 k 个地震统计区内第 i 个潜在震源区第 m_j 档地震发生的概率; S_{k_i} 为第 k 个地震统计区内第 i 个潜在震源区的面积.

西安报告^[23]考虑到地震环境对小区划场地的影响, 选取了 13 个计算控制点, 其分布见图 3.

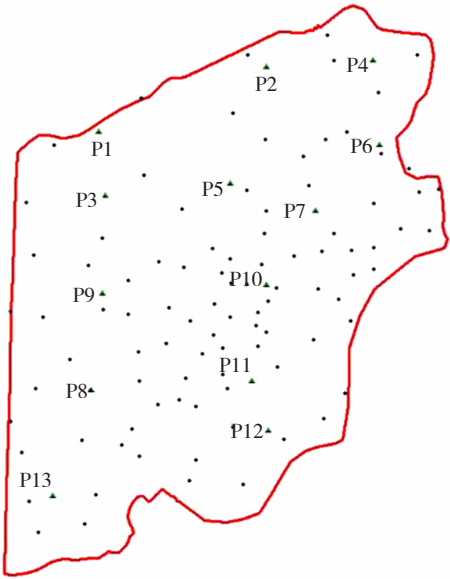


图 3 西安地区计算控制点分布图^[24]

Fig. 3 Distribution of control points in Xi'an region^[24]

选取计算控制点 P1、P4、P9、P10、P12、P13 进行概率地震危险性分析, 其坐标见表 5.

本文采用离散算法对计算控制点进行概率地震危险性分析, 将各潜在震源区离散成大小为 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 的栅格并当作点源处理, 分别计算每个栅格对计算控制点的地震动参数超越概率. 西安报告采用 CPSHA90 算法对各计算控制点进行地震危险性分析计算, 得到各计算控制点 50 a 超越概率 63%、10% 和 2% 的基岩峰值加速度. 以计算控制点 P9、P12 为例, 离散算法计算结果与 CPSHA90 算法计算结果的对比见图 4.

为回归系数, 具体取值见表 4; ε 表征回归分析中的不确定性, 一般假设服从对数正态分布, 均值为 0, 标准差为 σ .

假设地震的发生符合齐次泊松过程, 根据全概率公式可得, 工程场点处的 X 不小于给定值 x 的概率 $P(X \geq x)$ 为

表 4 西安地区地震动衰减关系系数^[23]

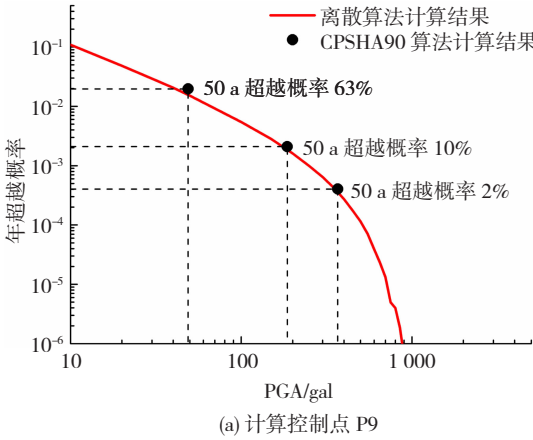
Tab. 4 Coefficients of ground motion attenuation relations in Xi'an region^[23]

PGA	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	σ
长轴	-0.841	1.275	-0.061	-1.587	0.710	0.477	0.232
短轴	-1.133	1.262	-0.058	-1.550	0.405	0.527	0.232

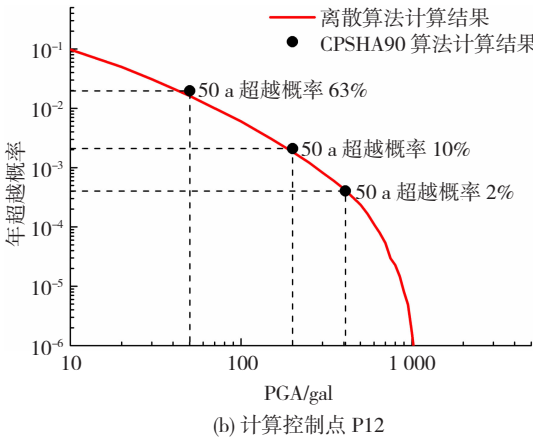
表 5 计算控制点及其坐标^[23]

Tab. 5 Control points and their coordinates^[23]

计算控制点	经度/(°)	纬度/(°)	所属区
P1	108.861	34.364	未央区
P4	109.072	34.409	灞桥区
P9	108.864	34.263	莲湖区
P10	108.990	34.268	碑林区
P12	108.991	34.177	雁塔区
P13	108.826	34.136	长安区



(a) 计算控制点 P9



(b) 计算控制点 P12

图 4 基岩峰值加速度超越概率对比

Fig. 4 Comparison of exceeding probability for peak ground acceleration

从图 4 可以看出,基于离散算法得到的 50 a 不同超越概率水平的基岩峰值加速度与基于 CPSHA90 算法得到的结果相近,所以,可以基于离散算法得到的超越概率曲线通过风险积分确定风险导向地震动参数.

3 西安地区风险导向地震动参数的确定

本文以丙类建筑中的钢筋混凝土框架结构为研究背景,基于西安地区不同计算控制点的地震危险性曲线,根据文献[1]的研究, β_R 取 0.6,3 个设防水准的目标条件倒塌概率分别取 $p_{dv} = 50\%$ 、 $p_{dm} = 10\%$ 、 $p_{dd} = 0.2\%$,计算得到了西安地区各计算控制点的 PGA_{RV} 、 PGA_{RM} 和 PGA_{RD} ,并在此基础上计算了 R_c 以及 K_1 、 K_2 . 以计算控制点 P12 为例,风险导向地震动参数的计算过程见图 5.

图 5(c)中红色实线下面包围的面积是 m_R 调整前对应的年倒塌概率,为 3.42×10^{-4} (相当于 50 a 倒塌概率 1.70%),此时的倒塌概率高于目标倒塌风险,需要提高 m_R 的值来调整风险积分失效密度曲线包围的面积,使其等于 2.0×10^{-4} (相当于 50 a 倒塌概率 1%),从而确定风险导向地震动参数. 图 5(b) 和图 5(c) 中蓝色虚线对应的 $m_R = 766.00$ gal. 将 m_R 代入式(6)~(8)进行统一决策分析可得 P12 点的风险导向地震动参数分别为 $PGA_{RV} = 766.00$ gal、 $PGA_{RM} = 355.05$ gal、 $PGA_{RD} = 136.22$ gal,进一步可得 $R_c = 0.86$ 、 $K_1 = 5.62$ 、 $K_2 = 2.61$.

由图 5 可知,50 a 超越概率 63% 对应的地震动强度对倒塌概率的贡献很小;50 a 超越概率 10% 和 2% 对应的地震动强度对倒塌概率的贡献较大;万年一遇对应的地震动强度对倒塌概率的贡献较小.

各计算控制点的风险导向地震动参数计算结果见表 6.

表 6 各计算控制点的计算结果

Tab. 6 Calculation results of each control point

计算控制点	PGA_M / gal	PGA_{RM} / gal	R_c	PGA_{RD} / gal	PGA_{RV} / gal	K_1	K_2
P1	321.52	290.19	0.90	111.34	626.07	5.62	2.61
P9	353.76	311.41	0.88	119.48	671.85		
P4	364.63	328.35	0.90	125.98	708.40		
P10	393.62	343.75	0.87	131.89	741.63		
P13	400.12	345.66	0.86	132.62	745.75		
P12	412.80	355.05	0.86	136.22	766.00		

注:计算控制点的顺序按 PGA_M 从小到大排列.

从表 6 可看出,随着 PGA_M 的增大, PGA_{RM} 逐渐增大,相应的 R_c 有逐渐减小的趋势. 由于 PGA_{RV} 、 PGA_{RM} 、 PGA_{RD} 是通过 m_R 统一决策分析得到的,所以,对于不同的计算控制点, K_1 和 K_2 是不变的.

本文对计算控制点 P9、P12 的风险导向地震动参数计算过程进行了对比分析,见图 6.

通过图 6 对比可以发现,计算控制点 P9 的年超越概率曲线略低于计算控制点 P12,但是经过风险积分计算得到的 P9 点的年倒塌概率(3.94×10^{-4})反而高于 P12 点的年倒塌概率(3.42×10^{-4}). 这是因为倒塌风险不仅与地震危险性有关,也与结构易损性有关. 因此,位于地震危险性水平较低地区但是抗倒塌能力较弱的建筑结构,其在地震作用下的倒塌概率可能高于地震危险性水平较高地区抗倒塌能力较强的建筑结构.

本文对风险导向地震动参数的研究为探索性研究,要想更精细化地确定风险导向地震动参数,需要对建筑结构的倒塌易损性进行深入研究,以确定不

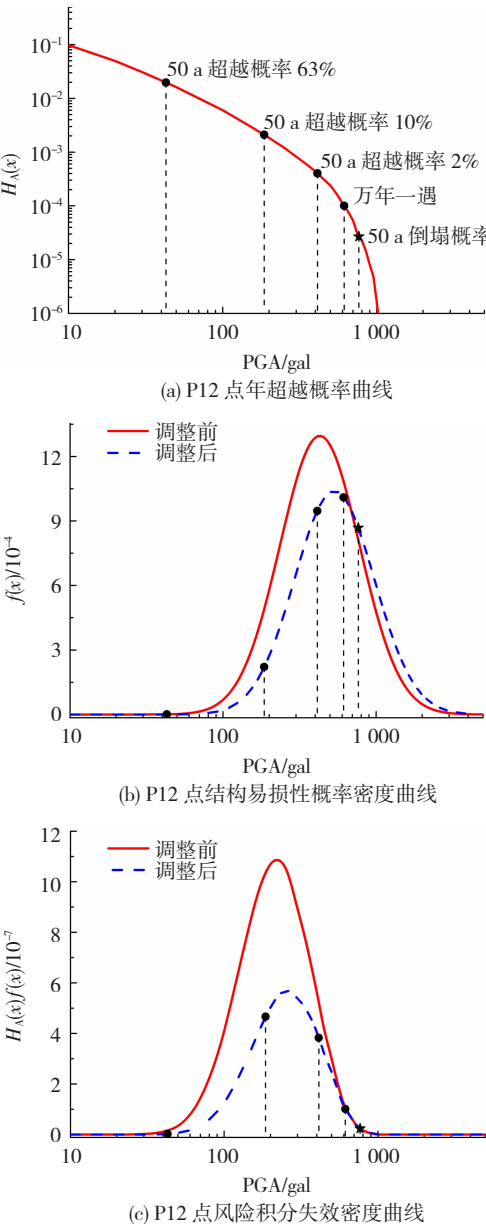


图 5 风险积分分解过程

Fig. 5 Risk integral deaggregation process

同结构类型、不同建造质量的建筑结构的地震易损性参数. 而且, 结构易损性是区域性指标, 地震危险性计算的则是计算控制点的概率, 如何将危险性与易损性更好地结合也有待进一步研究.

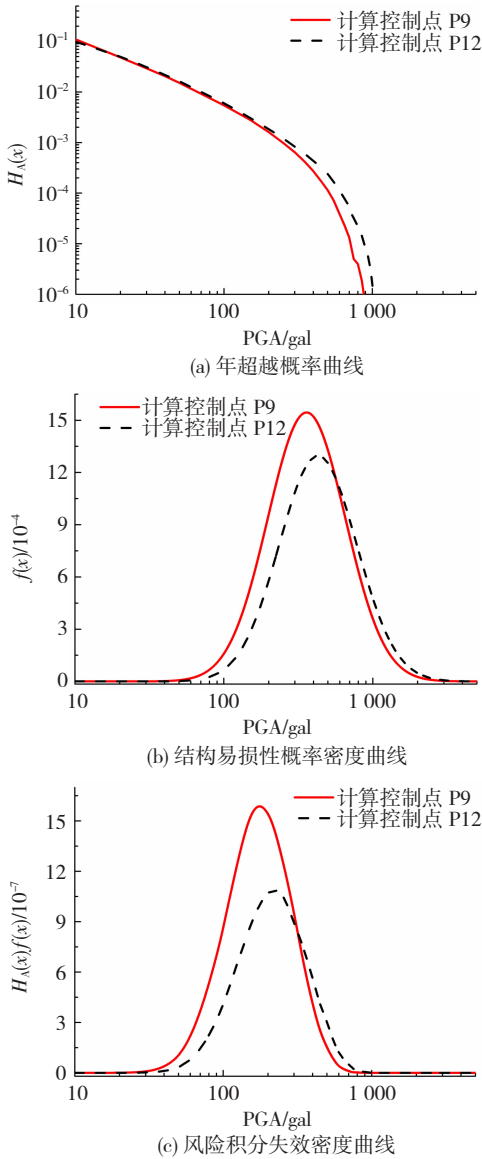


图 6 风险积分分解过程对比

Fig. 6 Comparison of risk integral deaggregation processes

4 西安地区风险导向地震动参数的影响分析

上节是在假设 $v_{IT} = 1.0\%$ 、 $\beta_R = 0.6$ 、 $p_{dV} = 50\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 0.2\%$ 的情况下得到的风险导向地震动参数计算结果. 本节进一步研究这些决策参数对风险导向地震动参数的影响规律.

本文作者在文献[2]中对适用于中国的风险导向地震动决策参数 v_{IT} 、 β_R 、 p_{dV} 、 p_{dM} 、 p_{dD} 进行了分析, 得出的 4 种方案见表 7. 本节基于表 7 中的取值, 对西安地区不同计算控制点的风险导向地震动参数进行了决策分析, 计算结果见表 8.

表 7 风险导向地震动决策参数反推结果^[2]

Tab. 7 Inversion results of risk-targeted decision parameters of seismic ground motions^[2]

方案	$v_{IT}/\%$	β_R	$p_{dV}/\%$	$p_{dM}/\%$	$p_{dD}/\%$
1	1.0	0.3	54.7	10.0	0.04
2	1.0	0.4	44.6	11.0	0.20
3	1.0	0.6	30.2	10.4	1.10
4	0.4	0.6	13.2	3.6	0.20

表 8 不同方案各计算控制点的计算结果

Tab. 8 Calculation results of each control point in different cases

方 案	计 算 控制点	PGA _M /gal	PGA _{RM} /gal	R_c	PGA _{RD} /gal	PGA _{RV} /gal	K_1	K_2
1	P1	321.52	301.99	0.94	162.23	459.56	2.83	1.86
	P4	364.63	352.05	0.97	189.12	535.75		
	P9	353.76	331.93	0.94	178.31	505.13		
	P10	393.62	375.01	0.95	201.46	570.69		
	P12	412.80	390.24	0.95	209.64	593.87		
	P13	400.12	381.90	0.95	205.16	581.18		
2	P1	321.52	298.76	0.93	154.31	462.17	3.00	1.94
	P4	364.63	344.82	0.95	178.11	533.43		
	P9	353.76	325.32	0.92	168.03	503.26		
	P10	393.62	365.04	0.93	188.55	564.71		
	P12	412.80	378.55	0.92	195.53	585.61		
	P13	400.12	369.77	0.92	190.99	572.02		
3	P1	321.52	294.13	0.91	158.42	458.64	2.90	1.86
	P4	364.63	332.81	0.91	179.25	518.96		
	P9	353.76	315.63	0.89	170.00	492.18		
	P10	393.62	348.42	0.89	187.66	543.30		
	P12	412.80	359.86	0.87	193.83	561.15		
	P13	400.12	350.35	0.88	188.70	546.32		
4	P1	321.52	289.78	0.90	151.67	436.34	2.88	1.91
	P4	364.63	333.59	0.91	174.60	502.30		
	P9	353.76	313.90	0.89	164.29	472.65		
	P10	393.62	351.91	0.89	184.19	529.89		
	P12	412.80	363.86	0.88	190.44	547.88		
	P13	400.12	357.09	0.89	186.90	537.68		

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[18] 中规定: 西安(未央、莲湖、碑林、灞桥、雁塔)的抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度值为 0.20 g; 西安(长安)的抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度值为 0.15 g. 结合表 5 中各计算控制点的所属区可知, 计算控制点 P1、P4、P9、P10、P12 的设计基本地震加速度为 0.20 g, 计算控制点 P13 的设计基本地震加速度为 0.15 g. GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[19] (以下简称“区划图”) 中给出的不同设防水平的地震动峰值加速度见表 9.

结合表 8、表 9 可以看出, 对于计算控制点 P1、P4、P9、P10、P12, 不同方案得到的各计算控制点的 PGA_{RV}、PGA_{RM}、PGA_{RD} 大都小于区划图给出的地震动峰值加速度; 对于计算控制点 P13, 不同方案得到的各级设防水平的 PGA_{RV}、PGA_{RM}、PGA_{RD} 均大于区划图中的地震动强度. 不同方案各计算控制点计算

得到的 R_c 均小于 1,这表明风险导向大震的地震动参数小于地震危险性曲线上 50 a 超越概率 2% 对应的地震动参数. 以上分析说明依据区划图提供的地震动参数进行抗震设防对大多数场点来说是偏于保守的. 区划图^[19]中指出:罕遇地震的地震动强度宜按基本地震所对应地震动强度的 1.6 ~ 2.3 倍确定,极罕遇地震的地震动强度宜按基本地震所对应地震动强度的 2.7 ~ 3.2 倍确定. 各方案计算得到的 K_1 值分别为 2.83、3.00、2.90、2.88, K_2 值分别为 1.86、1.94、1.86、1.91, K_1 和 K_2 的取值都在区划图建议的范围内. 本文在计算过程中发现, m_R 调整前各方案对应的倒塌概率范围分别是 0.76% ~ 0.91%、0.95% ~ 1.24%、1.58% ~ 2.26%、1.58% ~ 2.26%,所以本文认为方案 4 中 v_{IT} 取 0.4% 偏低. 对比不同方案的倒塌概率范围可知,方案 1 对应的倒塌概率偏低,所以本文认为方案 1 中 β_R 取 0.3 偏低. 经综合分析,本文认为对于中国规范和区划图,在西安地区,取 $v_{IT} = 1.0\%$ 、 $\beta_R = 0.4$ 、 $p_{dV} = 50\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 0.2\%$ 或 $v_{IT} = 1.0\%$ 、 $\beta_R = 0.6$ 、 $p_{dV} = 30\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 1.0\%$ 是合理的.

表 9 地震动峰值加速度确定结果^[19]

设防水平	地震动强度/g				
	7 度	7 度	8 度	8 度	9 度
	(0.10)	(0.15)	(0.20)	(0.30)	(0.40)
基本地震动	0.100	0.150	0.200	0.300	0.400
罕遇地震动	0.190	0.285	0.380	0.570	0.760
极罕遇地震动	0.290	0.435	0.580	0.870	1.160

在上述研究基础上,分别取 $\beta_R = 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0$, $v_{IT} = 1.0\%$ 、 $p_{dV} = 50\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 0.2\%$,通过参数影响分析研究了 β_R 对 PGA_{RM} 、 R_c 以及 K_1 和 K_2 的影响程度,见图 7.

由图 7 可知,随着 β_R 的增大, PGA_{RM} 、 R_c 、 K_1 和 K_2 总体上都逐渐增大. 其中, PGA_{RM} 和 R_c 的相对增长率(同一曲线中相邻两点 A、B 纵坐标之差的绝对值与 A 点纵坐标的比值)逐渐增大,这说明结构倒塌能力的不确定性越大,对 PGA_{RM} 和 R_c 的影响越大; K_1 和 K_2 的相对增长率均为常数,这说明 β_R 逐渐增大时对 K_1 和 K_2 的影响是不变的. 由于 R_c 为 PGA_{RM} 与 PGA_M 的比值,而对于同一计算控制点, PGA_M 相同,所以,图 7(a) 中 $PGA_{RM} - \beta_R$ 曲线与图 7(b) 中 $R_c - \beta_R$ 曲线的相对增长率相同. 图 7(c) 中 $K_1 - \beta_R$ 曲线的相对增长率大于 $K_2 - \beta_R$ 曲线,两者都大于图 7(a) 和图 7(b) 中相应曲线的相对增长率. 因此, β_R 对 K_1 和 K_2 的影响比对 PGA_{RM} 和 R_c 的影响大, β_R 对 K_1 影响最大.

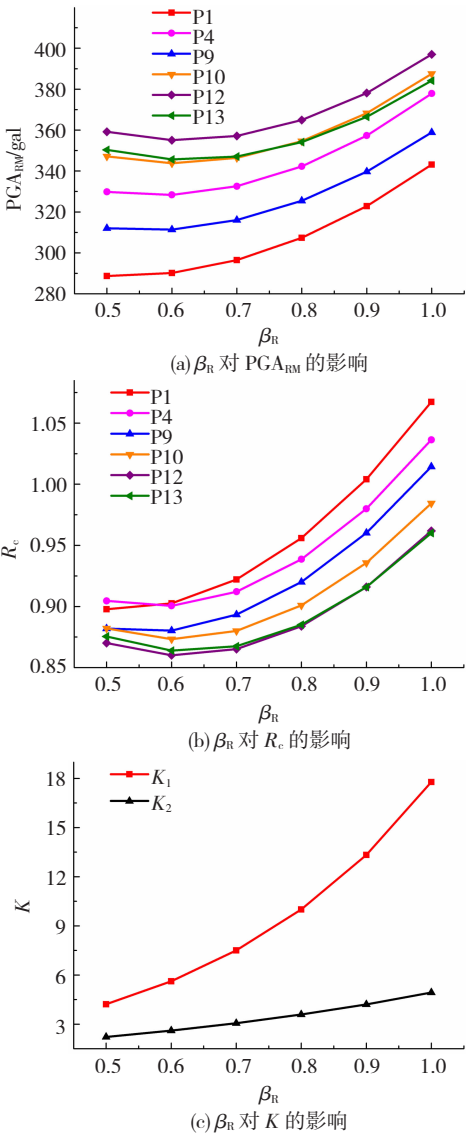


图 7 参数影响分析

Fig. 7 Parameter effect analysis

5 结 论

本文在对西安地区的计算控制点进行概率地震危险性分析的基础上,基于地震动决策参数已有的分析结果以及反推结果,采用风险积分的方法对西安地区的风险导向地震动参数进行了决策分析,得到了各计算控制点的 PGA_{RV} 、 PGA_{RM} 和 PGA_{RD} ,并计算了 R_c 、 K_1 和 K_2 ;然后分别取 $\beta_R = 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0$,通过参数影响分析研究了 β_R 对 PGA_{RM} 、 R_c 以及 K_1 和 K_2 的影响,得到以下结论:

- 1) 小震对应的地震动强度对倒塌概率的贡献很小,中震和大震对应的地震动强度对倒塌概率的贡献都较大,巨震对应的地震动强度对倒塌概率的贡献较小.
- 2) 风险积分同时考虑了场地的地震危险性和结构的地震易损性,对于同一地震动强度,地震危险

性曲线中年超越概率高的计算控制点,其倒塌概率并不一定高;换言之,对于不同的计算控制点,倒塌概率并不会随着极罕遇地震所对应地震动强度的增加而增加。

3) 对于中国规范和区划图,在西安地区,取 $v_{IT} = 1.0\%$ $\beta_R = 0.4$ $p_{dV} = 50\%$ $p_{dM} = 10\%$ 、 $p_{dD} = 0.2\%$ 或 $v_{IT} = 1.0\%$ $\beta_R = 0.6$ $p_{dV} = 30\%$ 、 $p_{dM} = 10\%$ $p_{dD} = 1.0\%$ 是合理的。

4) PGA_{RM} 、 R_c 、 K_1 和 K_2 总体上都随着 β_R 的增大而增大; β_R 越大,对 PGA_{RM} 和 R_c 的影响越大; β_R 增大时对 K_1 和 K_2 的影响不变。 K_1 和 K_2 比 PGA_{RM} 和 R_c 对 β_R 敏感,其中, K_1 对 β_R 最敏感。

参考文献

- [1] 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. DOI: CNKI;SUN;TMGC.0.2018-11-006
- [2] 王丛, 吕大刚. 基于抗震规范和地震动区划图的风险导向地震动决策参数分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8):26
WANG Cong, LÜ Dagang. Analysis of risk-targeted decision parameters of seismic ground motions based on seismic design code and ground motion zonation map of China[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(8):26. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0703
- [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, California; 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] SENGARA I W, MASYHUR I, SIDI I D, et al. Development of earthquake risk-targeted ground motions for Indonesian earthquake resistance building code SNI 1726—2012 [C]// Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP12). Vancouver, Canada; University of British Columbia, 2015:5
- [8] SENGARA I W, SIDI 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] DOUGLAS J, ULRICH T, NEGULESCU C. Risk-targeted seismic design maps for mainland France [J]. Natural Hazards, 2013(65):2010. DOI: 10.1007/s11069-012-0460-6
- [10] ULRICH T, DOUGLAS J, NEGULESCU C. Seismic risk maps for Eurocode—8 designed buildings [C]// Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES). Istanbul, Turkey: Turkish Earthquake Foundation Earthquake Engineering Committee and Prime Ministry, 2014:2
- [11] ALLEN T I, ADAMS J, HALCHUK S. The seismic hazard model for Canada: past, present and future [C]// Proceedings of the 10th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Building an Earthquake-Resilient Pacific. Sydney, Australia: Seismology Research Centre, 2015:6
- [12] ZANINI M A, HOFER L, FALESCHINI F, et al. The seismic risk map of Italy [C]// Proceedings of the 6th International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering (DCEE). Cagliari, Italy: University of Cagliari, 2017:5
- [13] VACAREANU R, PAVEL F, CRACIUN I, et al. Risk-targeted maps for Romania [J]. Journal of Seismology, 2018, 22(3):412. DOI: 10.1007/s10950-017-9713-x
- [14] SOKOLOV V, ZAHARAN H M. Seismic hazard analysis for development of risk-targeted ground-motion maps in the western Saudi Arabia [C]// Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering (ECEE). Thessaloniki, Greece: Aristotle University, 2018:10
- [15] 张晓梅. 基于抗倒塌设防目标的设计地震动区划研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2000:28
- [16] 陈鲲. 针对大地震设防的地震动参数确定方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2013:94
- [17] 陈鲲, 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
- [18] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [19] 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
- [20] MELCHERS R E, BECK A T. Structural reliability analysis and prediction [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2018:14
- [21] 庞健. 基于 ArcGIS 的西安地区地震危险性分析系统研究与开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015:83
- [22] 吕大刚, 刘亭亭, 李思雨, 等. 概率地震危险性分析、分解与设定地震及其在西安地区的应用 [J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(5):17
LÜ Dagang, LIU Tingting, LI Siyu, et al. Probabilistic seismic hazard analysis, deaggregation and scenario earthquakes with applications to Xi'an region [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(5):17. DOI: CNKI;SUN;DGGC.0.2018-05-002
- [23] 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
- [24] 贾晓琳. 基于随机有限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