

在役结构抗震鉴定加固用地震动参数确定方法

周小龙^{1,2}, 李英民^{1,2}, 罗文文¹, 卢海林²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 武汉工程大学 资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430073)

摘 要:为研究在役结构抗震鉴定加固用地震动参数的合理取值问题,以均匀泊松分布为地震发生的概率模型,给出不同地震风险中的结构应选用的抗震鉴定评估准则。考虑结构不同使用寿命及结构后续服役期内场地地震具有不同超越概率的影响,推导出各抗震评估准则下结构评估烈度在剩余使用寿命内的超越概率换算为设计基准期为 50 年的相当超越概率的计算公式;推导出各评估准则下水平地震影响系数最大值、地面峰值加速度与评估烈度之间的换算关系;给出结构在不同评估准则、不同剩余使用寿命下的抗震鉴定加固用地震动参数的调整系数。研究结果表明:研究能合理反映在役结构在后续服役期内的地震风险水平,对在役结构抗震鉴定加固的研究和应用有参考意义。

关键词:结构工程;地震动参数;超越概率;抗震鉴定;设防标准;地震危险性分区

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Method of determining ground motion parameters of seismic appraisal and reinforcement for existing structures

ZHOU Xiao-long^{1,2}, LI Ying-min^{1,2}, LUO Wen-wen¹, LU Hai-lin²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing 400045, China; 2. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, Hubei, China)

Abstract: In order to study the reasonable value of ground motion parameters of seismic appraisal and reinforcement for existing structures, the seismic appraisal criteria of structures in different seismic risks was established based on the Homogeneous Poisson distribution for earthquake occurrence. In view of the different residual service lives of structures and the different exceeding probability of earthquake in different sites, the calculation formulas of exceeding probability of assessment intensities were derived, while the exceeding probability based on the residual service life was converted to the well-matched exceeding probability based on the design reference period (i. e., 50 years); Besides, the conversion among maximum horizontal earthquake influence coefficient, peak ground acceleration and seismic intensity were derived; The adjustment coefficient of ground motion parameters of seismic appraisal and reinforcement for structures with different seismic appraisal assessment criteria and different residual service lives were provided in this paper. The results show that the research can reflect the level of earthquake risk of existing

收稿日期:2015-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51378404);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CDJXS11201167);

武汉工程大学科学研究基金项目(K201474)

作者简介:周小龙(1983-),男,湖北钟祥人,武汉工程大学讲师,重庆大学工学博士,E-mail:zhouxiaolong_83@163.com。

structures in their residual service lives reasonably, and it also has reference for the research and application of ground motion parameters of seismic appraisal and reinforcement for existing structures. 10 tabs, 2 figs, 18 refs.

Key words: structural engineering; ground motion parameter; exceeding probability; seismic appraisal; precautionary criterion; seismic hazard zone

0 引言

近年来,破坏性地震在中国时有发生,如 2008 年汶川 8 级地震,2010 年玉树 7.1 级地震,2013 年雅安 7.0 级地震等,这些地震的发生均造成大量房屋建筑和工程结构严重破坏或倒塌;同时,汶川地震后中国相关规范对部分城市抗震设防烈度的提高和对医疗、学校等建筑抗震设防类别的调整也导致大量建筑物不能满足现行抗震规范的要求^[1-2]。这些因素都使得大量在役结构特别是震损结构需要进行抗震鉴定和加固,而确定抗震鉴定加固用地震动参数是正确估计结构地震效应的基础。目前中国抗震鉴定加固用地震动参数的选取通常是通过确定结构在其后续服役期内所遭遇的地震烈度来确定的。

考虑到需要鉴定和加固的结构一般是已经服役过一段时间的结构,而这些结构又包括在服役期内已遭遇过设防烈度或超越设防烈度地震的结构和未遭遇设防烈度地震的结构,对其鉴定加固地震烈度的取值不仅要考虑建筑剩余使用寿命还要考虑结构在其剩余使用寿命内的地震超越概率。汶川地震后修订完成的《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—2009)通过引入“后续使用年限”的概念来体现不同建设时期地震烈度的差别,然而“后续使用年限”的概念不同于建筑剩余使用寿命(或后续服役期),它仅仅是一种加固设防水平的体现,这显然是不匹配的^[3]。目前,学术界对现役结构在剩余使用寿命内遭遇不同设防水准地震作用所对应的地震烈度取值的研究还不够系统^[3-7]。张超等在马玉宏研究成果的基础上,从地震发生概率入手分析了震损结构抗震加固用地震作用的取值方法^[3];毋剑平等以中国地震区划图为依据分析了不同剩余使用寿命下建筑遭遇地震作用的规律^[4];孙彬等在考虑地震危险性分区的基础上依据等超越概率原则给出了现役结构在不同服役期抗震评估地震作用的确定方法^[5-7]。虽然这些研究成果具有一定的参考价值,但文献[4-7]均未考虑震损结构和现有结构(未遭遇设防烈度地震作用)在后续服役期内面临的地震风险可能不

同,文献[3]针对震损结构统一按照等重现期原则确定地震作用的方法也值得商榷,因为不同地震危险性分区的震损结构在后续服役期内遭遇设防烈度地震的风险并不一定相同,西南地区很多城镇在 5 年内同时遭遇汶川地震和雅安地震的影响就说明了这一点。因此,对现役结构抗震鉴定加固用地震作用取值需要做进一步的研究。

为此,本文从地震发生的概率模型入手,分析了处于不同地震风险中的结构所选用的抗震评估设防标准,并以地震作用的极值分布为依据确定了结构对应于不同抗震评估设防标准的地震动参数的取值。

1 地震发生概率的数学模型

要确定结构在后续服役期遭受不同烈度地震作用的概率,首先需要了解结构所在区域在后续服役期内的地震发生概率。目前,描述地震发生概率的模型有很多,有均匀泊松模型、非齐次泊松模型、半马尔可夫模型等。单纯从地震发生概率上讲,大地震的发生在时间分布上并不是独立的,即在同一地点短期内发生 2 次或更多次大地震的概率较小,但结构所在场地的设防烈度是综合分析该结构附近区域所有潜在震源影响而得到的结果,因此可用地震发生概率模型中的均匀泊松分布模型来表征结构抗震鉴定加固用地震烈度发生的概率模型。假定:①相继发生的 2 次地震在大小、空间和时间上相互独立;②特定周期内,发生大于某一给定烈度地震的次数的数学期望为常数^[8]。根据均匀泊松模型,设某地区结构 T 年内遭遇 n 次烈度不小于 I 的地震的概率为 $P_T(I, n)$ ^[9],则有

$$P_T(I, n) = \frac{[\lambda(I)T]^n}{n!} e^{-\lambda(I)T} \quad (1)$$

式中: $\lambda(I)$ 为某场地 T 年内发生烈度 I 级以上地震的年平均发生率。

根据式(1), T 年内,该地区至少发生 1 次烈度不小于 I 的地震的概率 $P_T(I)$ 为

$$P_T(I) = 1 - P_T(I, 0) = 1 - e^{-\lambda(I)T} \quad (2)$$

2 抗震鉴定设防标准及其概率定义

《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—2009)中规定: 现有建筑后续使用年限内在具有相同概率保证的前提下, 应实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标, 随着结构重要性类别、服役期、地震危险性特征等因素的不同, 抗震鉴定设防标准也应不同, 即表现为对“小震、中震和大震”的概率定义应有所不同。由于抗震鉴定评估烈度与给定评估基准期内的超越概率有关, 当评估基准期与超越概率中的任一因素发生改变时, 评估烈度也会随之改变, 因此可以用评估基准期和超越概率来表征结构后续服役期内在不同抗震评估设防标准下遭遇的地震烈度的大小, 同时, 也可用不同的评估基准期来反映结构的重要性^[10]。

基于以上认识, 可以遵循以下 3 个原则来确定现有结构基于剩余寿命的抗震鉴定与加固用地震作用的取值: ①后续服役期统计荷载的设计基准期不变, 定义三水准地震的超越概率不变, 即现有结构在

不同后续服役期内遭遇原场地评估烈度(小震烈度、中震烈度或大震烈度)地震的概率与原结构相同; ②设计基准期等同结构剩余使用寿命, 定义三水准的超越概率不变, 即结构在后续服役期内遭遇评估烈度地震的概率标准与原结构相同; ③设计基准期等同结构剩余使用寿命, 结构在后续服役期内遭遇评估烈度地震的年平均发生率相同, 即结构在不同后续服役期内遭遇评估烈度地震的重现期相同。以上 3 个原则可分别称为: 相同评估烈度法、相同超越概率法和相同年平均发生率法。表 1 给出了不同抗震评估设防准则下结构抗震鉴定加固设计基准期和三水准地震超越概率。考虑到中国建筑结构抗震设计规范中确定的地震荷载统计参数, 都是按照设计基准期为 50 年确定的, 为了便于工程设计人员使用相关规范, 可将不同设计基准期的超越概率换算为设计基准期为 50 年的相当超越概率。下文将详细介绍相同设计烈度法、相同超越概率法和相同年平均发生率法的原理、风险特征以及基于以上 3 种评估准则的结构抗震鉴定评估烈度超越概率。

表 1 基于各抗震鉴定设防准则的结构设计基准期和三水准地震超越概率

Tab. 1 Structural design reference period and three level earthquake exceeding probabilities under different seismic appraisal criteria

设防准则	设计基准期/年	三水准地震超越概率		
		小震/ %	中震/ %	大震/ %
设防准则 1	50	63. 2	10	3
设防准则 2	t	63. 2	10	3
设防准则 3	t	$P'_i(i)$	$P'_i(i)$	$P'_i(i)$

注: $P'_i(i)$ 由后文分析确定。

2.1 相同评估烈度原则

设 $\lambda_{50}(I)$ 、 $\lambda_t(I)$ 分别为结构在设计使用年限 50 年和后续服役期 t 年内发生烈度大于等于 I 的地震的年平均发生率, 根据式(2)可得

$$P_{50}(I)=1-e^{-\lambda_{50}(I)T} \tag{3}$$

$$P_t(I)=1-e^{-\lambda_t(I)t} \tag{4}$$

根据相同评估烈度原则, 结构在不同后续服役期 t 年内遭遇相同评估烈度地震的概率与原结构相同, 有 $P_{50}(I)=P_t(I)$, 结合式(3)、式(4)得

$$\lambda_t(I)=\lambda_{50}(I)50/t \tag{5}$$

由式(5)可以看出, 随着剩余使用寿命的减小, 结构在后续服役期遭遇相同评估烈度地震的年平均

发生率逐渐增大, 这同时意味着结构加固维修成本的增加。表 2 给出了结构在后续服役期 t 年内各设计烈度地震的年平均发生率。

2.2 相同超越概率法

设原结构设计使用年限为 50 年, 评估烈度为 I , 年平均发生率为 $\lambda(I)$, 服役一段时间后, 剩余使用寿命为 t 年, 相应的评估烈度变为 i , 年平均发生率为 $\lambda(i)$, 由式(2)可得

$$P_{50}(I)=1-e^{-\lambda(I)50} \tag{6}$$

$$P_t(i)=1-e^{-\lambda(i)t} \tag{7}$$

设结构 50 年内超越小震烈度、中震烈度和大震烈度的概率分别为 P_1 、 P_2 和 P_3 , 记为 P_i (即新建结

表 2 各评估烈度在不同剩余使用寿命下的年平均发生率

Tab. 2 Mean annual incidences of each appraisal intensity under different residual service lives

后续服役期 t /年		50	40	30	20	10
年平均发生率	小震烈度(超越概率 63%)	0. 020	0. 025 0	0. 033 0	0. 050 0	0. 100
	中震烈度(超越概率 10%)	0. 002	0. 003 0	0. 004 0	0. 005 0	0. 010
	大震烈度(超越概率 5%) ^[10]	0. 001	0. 001 3	0. 001 7	0. 002 5	0. 005

构三水准评估烈度的超越概率),当评估基准期等于后续使用年限时,根据相同超越概率原则,有 $P_{50}(I)=P_i(i)=P_i$,转换到 50 年内至少发生 1 次烈度为 i 的地震的概率为

$$P_{50}(i)=1-e^{-\lambda(i)50}=1-e^{-\lambda(i)t(50/t)}=1-[1-P_i(i)]^{50/t}=1-(1-P_i)^{50/t} \tag{8}$$

表 3 给出了不同设计基准期内的结构相当于设计基准期为 50 年的三水准地震烈度的相当超越概率。

表 3 不同设计基准期下结构三水准地震烈度的超越概率(准则 2)

Tab. 3 Exceeding probabilities of three level earthquake intensity under different design reference periods (criteria 2)

后续服役期 t /年		50	40	30	20	10
年平均 发生率	小震/%	63.2	71.3	81.1	91.8	99.3
	中震/%	10.0	12.3	16.1	23.2	41.0
	大震/%	5.0	6.2	8.2	12.0	22.6

2.3 相同年平均发生率法

由式(6)、式(7)可知,当结构在后续服役期 t 年与原设计服役期 50 年内具有相同的评估烈度超越概率时,有

$$\lambda(i)=\lambda(I)50/t \tag{9}$$

定义 J 、 $P_i(J)$ 分别为准则 3 条件下结构剩余使用寿命为 t 年时的评估烈度和超越概率,则根据等年平均发生率原则 $\lambda(J)=\lambda(I)$,有: $P_i(J)=1-e^{-\lambda(J)t}=1-e^{-\lambda(I)t}<1-e^{-\lambda(i)t}=P_i(i)=P_i$,显然准则 3 条件下结构遭遇评估烈度地震的超越概率小于现有地震危险性分析结果确定的评估烈度超越概率 P_i (63.2%,10%,5%),考虑到目前中国地震烈度概率模型中有关参数的取值均基于现有地震危险性分析结果。为便于应用相关结果和规范,可在保证结构具有相同地震风险水平($P_i(J)=P_i$)的条件下,将基于现有地震危险性分析结果确定的三水准地震超越概率进行重新定义。为了满足 $P_i(J)=P_i$,根据式(9),需将 t 年内结构相应于评估烈度 J 的年平均发生率 $\lambda(I)$ 提高 $50/t$ 倍至 $\lambda(i)$,故确定评估烈度超越概率记为 $P'_i(i)$ 时,基于现有危险性分析结果的评估烈度 i 的年平均发生率 $\lambda(i)$ 也应相应提高 $50/t$ 倍,得

$$P'_i(i)=1-e^{-\lambda(i)(50/t)t}=1-[1-P_i(i)]^{50/t}=1-(1-P_i)^{50/t} \tag{10}$$

将 $P'_i(i)$ 换算为设计基准期为 50 年的相当超越概率,带入式(8)得

$$P'_{50}(i)=1-[1-P'_i(i)]^{50/t}=1-\{1-[1-(1-P_i)^{50/t}]\}^{50/t}=1-(1-P_i)^{50^2/t^2} \tag{11}$$

表 4 给出了设防标准 3 条件下结构在各水准地震下的相当超越概率。

表 4 不同设计基准期下结构三水准地震烈度的超越概率(准则 3)

Tab. 4 Exceeding probabilities of three level earthquake intensity under different design reference periods (criteria 3)

后续服役期 t /年		50	40	30	20	10
年平均 发生率	小震/%	63.2	79.0	93.8	99.8	100
	中震/%	10.0	15.2	25.4	48.2	92.8
	大震/%	5.0	7.7	13.3	27.4	72.3

2.4 抗震鉴定评估准则的选用

抗震鉴定评估准则直接体现了结构在剩余使用寿命内抗震设防目标的不同^[11]。目前,中国对在役结构抗震鉴定地震作用的取值主要是通过基于相同超越概率原则确定的,但显然对于大部分场地,遭遇过设防烈度地震作用而损伤的结构与未遭遇过设防烈度地震作用的结构相比在剩余寿命期内再次遭遇设防烈度地震的概率会减小。因此抗震鉴定评估准则的选取应综合考虑场地地震危险性水平、结构的功能以及后续加固增加设防投资的成本。通过前文分析可知,选用不同的抗震鉴定评估准则,结构在后续服役期的抗震安全指标也不同,当结构后续服役期相同时,按照相同设计烈度法、相同超越概率法、相同年平均发生率法确定的抗震设防目标依次减小。因此选用设防标准低的评估准则就会使得大量需要拆除的结构特别是一些震损结构具有加固改造的意义,这是符合中国国情的。统计表明^[12]:对有加固意义的建筑,对其加固改造比新建能节约成本约 40% 以上,缩短工期 50% 以上,同时也能减小房屋拆迁造成的大量建筑垃圾;很显然,在当前中国经济条件下,在保障建筑安全性的同时,应尽可能采用加固改造而非拆除来处理这些需要进行抗震鉴定的结构。因此,采用哪种抗震鉴定评估准则完全取决于如何找到成本与安全的平衡点。

3 地震烈度概率模型

目前地震工程学者对地震动参数的概率分布规律普遍认可的结论是其服从极值分布,高小旺等通过对已有统计资料的分析,进一步明确地震烈度能较好地符合极值Ⅲ型分布^[13],其分布函数为

$$F_{\text{III}}(I)=e^{-(\frac{\omega-I}{I_m})^k} \tag{12}$$

式中: I 为地震烈度; ω 为地震烈度上限值,取 $\omega=12$ 度; I_m 为众值烈度,为给定设计基准期内超越概率为 $1-e^{-1}$ 的烈度, I_m 可通过地震危险性分析确定; k 为形状参数。

基于现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),形状参数 k 可通过基本烈度来确定,如表 5 所示。考虑到中国地震动参数区划图给出的是相当于 50 年超越概率为 10% 的以Ⅱ类场地为标准场地的地震动峰值加速度分区图,该区划图没有给出其

表 5 不同基本烈度值对应的形状参数 k 和众值烈度

Tab. 5 Shape parameter k and multi-value intensity corresponding to the basic intensity

基本烈度	6 度	7 度(0.10g)	7 度(0.15g)	8 度(0.20g)	8 度(0.30g)	9 度
形状参数 k	9.79	8.33	7.60	6.87	6.14	5.40
众值烈度 I_m	4.45	5.45	5.95	6.45	6.95	7.45

李亚琦通过对中国 6 376 个地点的地震危险性特征分析,将中国划分为 3 个分区,以形状参数 k 来表征不同分区的地震危险性差异,并给出了 k 值,对于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区, k 分别等于 6、10、20^[16]。表 6 给出了根据式(12)确定的各地震危险性特征区划内对应于基本烈度的众值烈度值。可以看出,随着场地类

表 6 各地震危险性特征区划内对应于基本烈度的众值烈度值

Tab. 6 Multi-value intensity corresponding to the basic intensity in each seismic hazard zone

基本烈度	Ⅰ区($k=6$)		Ⅱ区($k=10$)		Ⅲ区($k=20$)	
	I_m	ΔI	I_m	ΔI	I_m	ΔI
6 度			4.49	1.51	5.29	0.71
7 度(0.10g)	4.72	2.28	5.74	1.26		
7 度(0.15g)	5.45	2.05	6.36	1.14		
8 度(0.20g)	6.18	1.82	6.99	1.01		
8 度(0.30g)	6.91	1.59	7.62	0.88		
9 度			8.24	0.76		

注: ΔI 为 I_m 与基本烈度的差值。

本文认为,形状参数 k 的确定既要考虑不同烈度带来的差异也要考虑不同危险性分区带来的差异。考虑到目前暂时缺少相关地震统计资料,而根据中国主要城市地震危险性特征分区结果^[16],大部分区域属于Ⅱ区,只有少部分 7、8 度区属于Ⅰ区,另外一部分 6 度区属于Ⅲ区。因此Ⅰ区、Ⅲ区形状参数可采用根据分析不同危险性分区确定的取值,Ⅱ区可综合考虑不同危险性分区和烈度的影响。工程设计人员在没有结构所在场地地震危险性分析资料

表 7 改进的不同危险性分区内的形状参数 k 和评估烈度

Tab. 7 Improved value of shape parameter k and assessment intensity in each seismic hazard zone

中震烈度	Ⅰ区			Ⅱ区			Ⅲ区		
	小震烈度	大震烈度	形状参数	小震烈度	大震烈度	形状参数	小震烈度	大震烈度	形状参数
6 度				4.47	6.92	9.895	5.29	6.48	20
7 度(0.10g)	4.72	8.20	6	5.60	7.83	9.082			
7 度(0.15g)	5.45	8.58	6	6.16	8.28	8.618			
8 度(0.20g)	6.18	8.96	6	6.72	8.74	8.107			
8 度(0.30g)	6.91	9.36	6	7.29	9.19	7.543			
9 度				7.85	9.64	6.917			

他概率水准的地震动参数^[14]。表 5 中的形状参数 k 是通过简单规定基本烈度和众值烈度相差 1.55 度,罕遇烈度和基本烈度相差 1 度来确定的。很显然这种处理方法虽然方便了工程应用,但没有考虑不同场地本身具有地震危险性差异的特征^[15]。

别的不同,众值烈度与基本烈度的差值并不完全相同。虽然通过考虑不同区域地震危险性差异确定的形状参数的方法较根据规范确定形状参数的方法有所改进,但该方法将同一危险性特征区的不同烈度区的形状参数取为同一值不是很合理,表 5 在一定程度上也反映出了这个问题。

的前提下,可将规范法和考虑危险性分区法确定的场地小震烈度和中震烈度的差值取平均,再通过式(12)反算形状参数,以此计算结果作为改进的形状参数值,结果如表 7 所示。

根据表 3、表 4 中超越概率 P 和表 7 中形状参数 k 及众值烈度 I_m ,运用式(12),可计算出各危险性分区内具有不同后续服役期的结构在不同设防准则下的评估烈度转化为设计基准期为 50 年时的相当评估烈度。下页表 8 给出了设防准则 2 和设防准

表 8 不同后续服役期内各危险性特征分区三水准评估烈度(准则 2、准则 3)

设防准则	危险性特征分区	三水准评估烈度	6 度			7 度			8 度			9 度		
			20 年	30 年	40 年	20 年	30 年	40 年	20 年	30 年	40 年	20 年	30 年	40 年
设防准则 2	Ⅰ 区	小震烈度				3.53	4.09	4.46	5.23	5.67	5.97			
		中震烈度				6.17	6.56	6.81	7.34	7.64	7.85			
		大震烈度				6.83	7.17	7.40	7.87	8.14	8.32			
	Ⅱ 区	小震烈度	3.74	4.07	4.30	4.92	5.23	5.44	6.09	6.38	6.58	7.26	7.53	7.71
		中震烈度	5.42	5.68	5.86	6.47	6.71	6.88	7.52	7.74	7.89	8.58	8.77	8.90
		大震烈度	5.88	6.13	6.29	6.89	7.11	7.27	7.90	8.10	8.24	8.91	9.09	9.21
	Ⅲ 区	小震烈度	4.97	5.11	5.21									
		中震烈度	5.72	5.84	5.93									
		大震烈度	5.94	6.06	6.15									
设防准则 3	Ⅰ 区	小震烈度				2.13	3.37	4.16	4.10	5.10	5.73			
		中震烈度				5.21	6.07	6.61	6.57	7.26	7.69			
		大震烈度				5.98	6.74	7.22	7.18	7.79	8.18			
	Ⅱ 区	小震烈度	2.94	3.65	4.12	4.16	4.83	5.27	5.38	6.01	6.42	6.59	7.19	7.57
		中震烈度	4.78	5.35	5.72	5.88	6.40	6.75	6.99	7.46	7.77	8.09	8.52	8.80
		大震烈度	5.29	5.81	6.16	6.35	6.83	7.15	7.41	7.85	8.13	8.48	8.87	9.12
	Ⅲ 区	小震烈度	4.64	4.93	5.13									
		中震烈度	5.42	5.69	5.86									
		大震烈度	5.66	5.91	6.08									

则 3 条件下基于结构不同后续服役期内各危险性特征分区三水准评估烈度。

4 地震动参数调整

大量研究结果表明,峰值加速度 A 和地震烈度 I 之间存在着相互转换关系,例如刘恢先教授给出了设计基准期为 50 年时,场地超越概率为 10% 的地震烈度 I_a 与之对应的地面峰值加速度 A 之间的关系式^[17]

$$A=10^{I_a \lg(2-0.115 \ 1)} \tag{13}$$

需要指出的是,式(13)是通过统计分析中国 1980 年以前强震记录得到的结果^[3,17],实际上 1980 年以后很多强震记录比式(13)计算的结果要大^[18],但基本形式没有改变。因此,结合现行抗震设计规范中相关数据,参考式(13),各设防水准下的地震烈度 I_i 与地面峰值加速度 A 之间的关系式可表示为

$$A=10^{I_i \lg(R_i-C_i)} \quad i=1,2,3; \quad j=\text{I,II,III} \tag{14}$$

式中: I_1 、 I_2 、 I_3 分别为小震烈度、中震烈度和大震烈度; R_i 、 C_i 为待定参数。

通过现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中提供的各水准地震加速度值和前文分析确定的各水准地震的烈度,可得到不同水准地震下地面峰值加速度和烈度之间的关系。图 1、下页图 2 分别为通过回归分析得到危险性分区为Ⅰ区和Ⅱ区

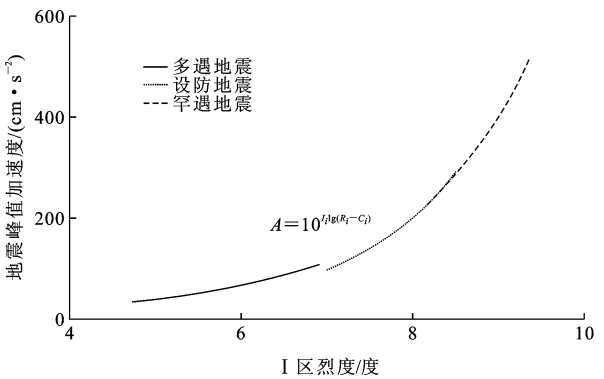


图 1 Ⅰ区结构各水准地震下峰值加速度和烈度的关系
Fig. 1 Relation of peak ground acceleration and seismic intensity in zone I

时,不同水准地震下的场地峰值加速度和设计烈度的拟合关系。

通过分析图 1 和图 2 可知:①不同危险性分区在相同水准地震下的场地峰值加速度与烈度的关系并不固定;②相同地震危险性分区内的各水准地震下的场地峰值加速度与烈度的关系也不是固定的。可见对不同水准地震下的场地峰值加速度和设计烈度之间关系的确定是有必要的。下页表 9 给出了通过回归分析得到的 R_i 、 C_i 在各危险性分区内不同水准地震下的具体数值,考虑到危险性分区为Ⅲ区的场地只有 6 度区,Ⅲ区中参数 R_i 、 C_i 的取值可参考式(14)确定。

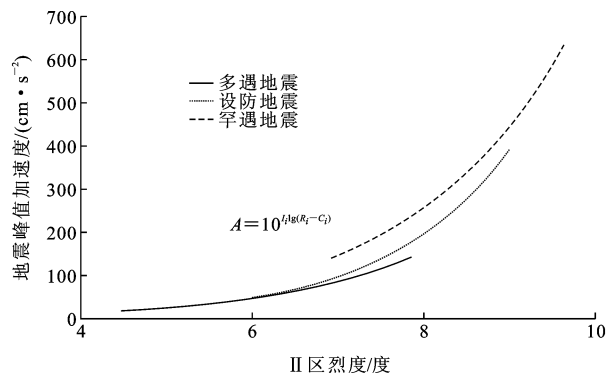


图 2 II 区结构各水准地震下峰值加速度和烈度的关系

Fig. 2 Relation of peak ground acceleration and seismic intensity in zone II

表 9 参数 R_i 、 C_i 的回归分析结果

Tab. 9 Regression analysis results of parameter R_i & C_i

参数		多遇地震	设防地震	罕遇地震
I 区	R_i	1.669	2.000	1.990
	C_i	-0.497 0	0.115 1	0.084 0
II 区	R_i	1.737	2.000	1.807
	C_i	-0.489 0	0.115 1	-0.139 0
III 区	R_i	2.000	2.000	2.000
	C_i	0.115 1	0.115 1	0.115 1

抗震规范中

$$\alpha_{\max}=\beta_{\max}A/g$$
(15)

式中： α_{\max} 为地震影响系数最大值； A 为地面峰值加速度； β_{\max} 为动力系数最大值， $\beta_{\max}=2.25$ ； g 为重力加速度。

式(15)中 α_{\max} 是设计基准期为 50 年的场地地震影响系数最大值。设在役结构后续服役期为 t 年时的地震影响系数最大值为 α'_{\max} ，结合式(14)、式(15)，可得

$$\alpha'_{\max}=\beta_{\max}10^{I_i\lg(R_i-C_i)}/g$$
(16)

根据抗震设计规范，结构水平地震作用与地震影响系数最大值 α_{\max} 成正比关系，因此可将不同设防水准后续服役期为 t 年的地震影响系数最大值与设计使用年限和设计基准期均为 50 年的地震影响系数最大值 α_{\max}^{50} 的比值 γ ，作为建筑结构考虑不同剩余使用寿命的抗震鉴定加固用地震作用的调整系数。

$$\gamma=\frac{\alpha'_{\max}}{\alpha_{\max}^{50}}=\frac{10^{I_i\lg(R_{ij}-C_{ij})}}{10^{I_i^{50}\lg(R_{ij}-C_{ij})}}=10^{(I_i-I_i^{50})\lg(R_{ij})}$$
(17)

根据式(17)，各不同地震危险性特征分区内地震作用调整系数如表 10 所示。

表 10 不同服役期内结构抗震鉴定地震作用调整系数(准则 2、准则 3)

Tab. 10 Modification factors under different residual service lives and in different seismic hazard zones (criteria 2 & criteria 3)

设防准则	危险性特征分区	三水准评估烈度	6 度			7 度			8 度			9 度		
			20 年	30 年	40 年	20 年	30 年	40 年	20 年	30 年	40 年	20 年	30 年	40 年
设防准则 2	I 区	小震烈度				0.543	0.721	0.871	0.613	0.770	0.896			
		中震烈度				0.564	0.735	0.877	0.633	0.782	0.900			
		大震烈度				0.604	0.762	0.891	0.668	0.805	0.912			
	II 区	小震烈度	0.670	0.804	0.912	0.689	0.817	0.918	0.707	0.829	0.924	0.724	0.840	0.929
		中震烈度	0.668	0.802	0.909	0.692	0.818	0.917	0.718	0.835	0.926	0.745	0.853	0.934
		大震烈度	0.726	0.840	0.927	0.748	0.854	0.934	0.772	0.869	0.941	0.797	0.885	0.949
	III 区	小震烈度	0.805	0.888	0.950									
		中震烈度	0.823	0.898	0.954									
		大震烈度	0.829	0.901	0.956									
设防准则 3	I 区	小震烈度				0.264	0.501	0.750	0.345	0.575	0.795			
		中震烈度				0.290	0.526	0.765	0.371	0.598	0.807			
		大震烈度				0.336	0.568	0.790	0.418	0.636	0.828			
	II 区	小震烈度	0.429	0.636	0.826	0.454	0.656	0.837	0.477	0.676	0.848	0.499	0.694	0.858
		中震烈度	0.429	0.636	0.825	0.461	0.662	0.840	0.495	0.689	0.855	0.532	0.718	0.871
		大震烈度	0.511	0.698	0.859	0.543	0.722	0.871	0.577	0.748	0.885	0.616	0.775	0.899
	III 区	小震烈度	0.640	0.784	0.900									
		中震烈度	0.671	0.804	0.910									
		大震烈度	0.680	0.810	0.913									

5 结 语

(1)不同的在役结构抗震评估准则反映了结构

在其后续服役期内遭受地震风险的不同,基于“相同设计烈度准则”、“相同超越概率准则”和“相同年平均发生率准则”确定的抗震鉴定用地震作用依次减

小,但结构遭遇地震损伤甚至破坏的风险却依次增大。

(2)地震烈度概率模型中以形状参数 k 表征地震危险性差异,形状参数 k 的取值既考虑了不同分区地震危险性差异的影响,也考虑了同一分区不同烈度区地震危险性差异的影响。在形状参数 k 基础上确定的在役结构抗震鉴定加固用地震动参数更合理和准确。

(3)按照“相同年平均发生率准则”确定的地震作用是对按照现行规范选用的“相同超越概率准则”确定的地震作用的折减,这会使得大量需要拆除的结构特别是震损结构具有了加固改造的意义,符合中国当前抗震评估策略。

(4)结构在后续服役期的抗震设防烈度是确定结构抗震鉴定与加固用地震动参数的关键,而抗震设防烈度的确定却十分复杂,它既要考虑结构的功能以及经济效益,也要考虑结构重要性不同的影响,如何给出一个更合理的计算模型需要进一步的研究。

参考文献:

References:

[1] GB 50223—2008, 建筑工程抗震设防分类标准[S].
GB 50223—2008, Standard for classification of seismic protection of building constructions[S]. (in Chinese)

[2] 黄 华, 刘伯权, 张彬彬, 等. 钢筋混凝土抗震框架连续倒塌行为分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 35-44.
HUANG Hua, LIU Bo-quan, ZHANG Bin-bin, et al. Analysis of progressive collapse behavior of earthquake-resistant reinforced concrete frame[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 35-44. (in Chinese)

[3] 张 超, 翁大根. 震损建筑抗震鉴定加固中地震作用取值研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 61-68.
ZHANG Chao, WENG Da-gen. Research on earthquake action for seismic appraisal and retrofit of earthquake-damaged buildings[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 61-68. (in Chinese)

[4] 毋剑平, 白雪霜, 孙建华. 不同设计使用年限下地震作用确定方法[J]. 工程抗震, 2003, 25(2): 36-39.
WU Jian-ping, BAI Xue-shuang, SUN Jian-hua. The way to calculate the seismic action in different design working life[J]. Earthquake Resistant Engineering, 2003, 25(2): 36-39. (in Chinese)

[5] 孙 彬, 牛荻涛, 董振平. 在役结构抗震评估地震作用取值研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2003, 35(4): 312-316.
SUN Bin, NIU Di-tao, DONG Zhen-ping. Research on earthquake action for seismic assessment of existing structures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2003, 35(4): 312-316. (in Chinese)

[6] Ni Y J, Chen J Y, Teng H L, et al. Influence of earthquake input angle on seismic response of curved girder bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(4): 233-241.

[7] 雷 拓, 钱 江, 苏晓燕. 现役结构抗震评估地震作用确定方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(4): 620-624.
LEI Tuo, QIAN Jiang, SU Xiao-yan. Earthquake action determination for seismic assessment of existing structures[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(4): 620-624. (in Chinese)

[8] 陈朝晖, 卢有杰, 刘西拉. 大地震发生概率的半马尔可夫模型[J]. 工程力学, 1995(增1): 1983-1988.
CHEN Chao-hui, LU You-jie, LIU Xi-la. Semi-markov model of earthquake occurrence probability[J]. Engineering Mechanics, 1995 (S1): 1983-1988. (in Chinese)

[9] 洪 峰, 谢礼立. 工程结构抗震设计中小震、中震和大震的确定方法[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(2): 1-6.
HONG Feng, XIE Li-li. Method of determining minor, moderate and major earthquake in earthquake-resistant design of engineering structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 1-6. (in Chinese)

[10] 谢礼立, 马玉宏. 基于抗震性态的设防标准研究[J]. 地震学报, 2002, 24(2): 200-209.
XIE Li-li, MA Yu-hong. Studies on performance-based seismic design criterion[J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(2): 200-209. (in Chinese)

[11] 丁伯阳, 赵 冬, 李通坤, 等. 在役结构后役期的设防烈度探讨[J]. 地震学报, 2005, 27(6): 677-681.
DING Bo-yang, ZHAO Dong, LI Tong-kun, et al. On the defense intensity during succeed use period of the existing structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(6): 677-681. (in Chinese)

[12] 张 鑫, 李安起, 赵考重. 建筑结构鉴定与加固改造技术的进展[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 1-11.