

文章编号: 0253-3782(2002)02-0200-09

基于抗震性态的设防标准研究^{*}

谢礼立^{1, 2)} 马玉宏¹⁾

1) 中国哈尔滨 150090 哈尔滨工业大学土木工程学院

2) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

摘要 以基于性态的抗震设计为出发点, 并以我国为例, 针对目前国内外抗震设防标准的若干问题和不足, 提出了基于性态抗震设计的三环节抗震设防方法. 将现有的设防内容改为确定结构的抗震设计类别、确定设计烈度或设计地震动参数、确定建筑的重要性等级 3 个方面, 并分别在每一方面进行具体深入的研究, 从而形成了一套完整的基于性态的抗震设防标准确定的原则、方法和框架, 可以直接用来编制规范供抗震设计使用.

关键词 基于性态的抗震设计 抗震设防标准 设防烈度 地震危险性特征 地震易损性
地震经济损失估计 可接受的地震死亡率

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

引言

目前, 国内外公认的减轻地震灾害的最有效措施是对工程结构进行合理而又经济的抗震设防. 从广义来说, 工程抗震设防应该包含下列 7 个方面的内容: ①确立设防的原则; ②确定设防的目标; ③确定设防参数(烈度或地震动)及其具体的数值; ④确定工程的重要性类别和相应的重要性系数; ⑤确定工程抗震设计方法; ⑥确定适当的抗震措施; ⑦确定恰当的施工质量保证规定. 一套完备的抗震设计规范恰恰就是从这几个方面对抗震设防给出具体的规定, 以确保所设计的结构既经济而又具有一定的抗震能力. 而其中的前 4 项内容, 称为狭义的设防, 是整个抗震设防的基础, 一般均在规范的总则或前几章中给以阐述并做出具体的规定. 本文也主要从这 4 个方面对我国现有的抗震设计规范的规定、存在的问题和改进的方法进行研究. 20 世纪 70 年代以来, 全球大中城市发生了一系列的破坏性地震, 为全世界开展这方面的研究提供了重要的启示. 基于性态的抗震设计理论就是在这样的背景下, 综合考虑近年来社会经济发展和工程实践而对地震工程研究人员所提出的新课题. 由于工程抗震的效果很大程度上取决于所制定的抗震设防标准, 制定的设防标准不同, 工程建筑在地震中的表现及所造成的损失会截然不同(谢礼立等, 1996), 因此, 制定“基于性态的抗震设防标准”就成为性态抗震设计中迫切需要研究的问题, 对抗震设计以及规范的改进和发展具有重要的意义.

^{*} 国家自然科学基金(59895410)和地震科学联合基金(95-07-444), 以及国家重点基础研究发展规划《大陆强震机理与预测项目》(95130603)共同资助项目.

2001-08-29 收到初稿, 2002-02-04 收到修改稿并决定采用.

1 基于性态的三环节抗震设防方法

我国建筑结构的抗震设计原则是“经济和安全，特别是确保人的生命安全”，相应的设防目标则为“大震不倒，中震可修，小震不坏”，反映在规范中的抗震设计思想是：“经抗震设计的绝大多数建筑物在遇到破坏性地震时，容许其出现一定的破坏，但应确保生命安全”。根据这样的思想，我国抗震设计规范的主要设防内容包括确定设计烈度(或地震动参数)及确定建筑重要性类别两个环节。这样规定的原则、目标和设计思想在我国抗震设计历史上，特别是在人们对地震破坏现象认识还很不充分和我国经济发展水平较低年代曾经发挥过重要的作用。从现代科学技术发展水平和社会经济发展现状来看，传统的抗震设防思想和方法已暴露出许多缺点，不能适应需要。例如：

1) 设防烈度(地震动)单纯依据地震区划的结果以及部分工程抗震经验来确定，很少或没有考虑设防烈度的取值对经济损失或人员伤亡的定量或半定量影响，从而难以通过设防烈度(地震动)的取值来控制未来地震的经济损失和人员伤亡。

2) 确定设防的“大震”和“小震”全国采用统一的规定，未能考虑我国各地地震危险性客观存在的巨大差异，从而在有的地区会造成抗震投资的浪费，而在另外一些地区则可能存在不安全的隐患。

3) 目前抗震规范的设计思想主要考虑使结构在“大震”时不倒塌、确保人身安全，但没有考虑确保有些建筑物的功能在地震时仍需正常发挥的要求。近 20 年来的大地震已经表明，许多结构虽然没有倒塌，甚至还不到严重破坏的程度，但由于地震损坏使结构的使用功能无法正常发挥，而导致不可接受的严重经济损失。这种过于简单的确保安全的思想，显然已不能满足社会和公众对结构抗震设计的需求。

4) 对于具有不同重要性类别的建筑物，主要采用增减设计地震荷载或相应的抗震措施来保证。而反映这种设计地震荷载增减的重要性系数的确定主要是凭经验得到，无法定量说明考虑了这种地震荷载的增减或相应的措施后结构到底提高或降低了多少安全性。另外，在确定建筑物重要性系数时，也只考虑建筑物的重要性类别，而没有考虑结构所在地区的地震危险性差异，从而同样重要性类别的结构在不同地震危险程度的地区都采用相同的增减地震荷载的重要性系数，导致建筑物实际抗震能力的增减差别很大。

为了改变传统的抗震设计思想，并改进现有抗震设防中存在的缺点，从而使所制定的设防标准既能有效地控制经济损失和人员伤亡，又能保障结构在地震作用下的使用功能，本文提出了基于性态的三环节抗震设防方法，即将现有的设防内容改为：确定结构的抗震设计类别；确定设计烈度或设计地震动参数；确定建筑的重要性等级。

有关性态和基于性态的抗震设计概念可参阅谢礼立(2000)文章，这里不再赘述。

2 结构的抗震设计类别

结构的抗震设计类别是指根据设计地震动参数和建筑物使用功能不同的要求，所确定的结构在设计时应采用的防御标准的度量，包括需采用的抗震设计方法和相应的构造措施。表 1 对 4 类不同使用功能的结构，针对偶遇地震的使用功能目标提出了设计类别具体的建议(谢礼立，2000)。抗震设计类别由 A 到 E，需要采取的抗震设计规定和方法由低到高，设计类别 E 要求提供最高的抗震设防方法。有关 A，B，C，D 和 E 的具体规定属广义

抗震设防的内容，已超出本文研究的范围，这里不予讨论。

3 设防烈度或设计地震动参数

设防水准是指工程设计中如何根据客观的地震环境和已定的设防目标，并考虑具体的社会经济条件来确定采用多大的设防参数，或者说，应选择多大强度的地震作为防御的对象(谢礼立等，1996)，它直接关系到未来结构物的抗震能力。确定设防地震动参数时需要研究的主要内容见图 1。

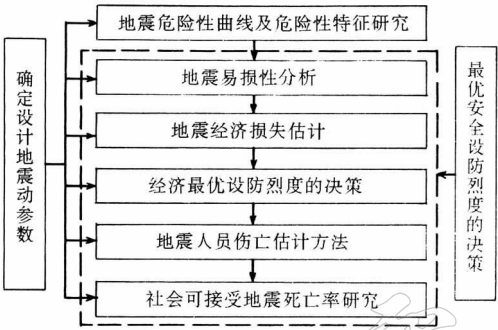


图 1 确定设计地震动参数的步骤

上统计计算出来的平均值(高小旺，鲍霁斌，1989)，因此有一定的局限性。此外，采用 1.55 和 1 度这两个固定值对结构进行抗震验算，实际上是忽略了全国各地地震危险性的差异。事实上，我国地域辽阔，各个地区的地震活动性都很不相同，因此，在抗震设防中考虑地震危险性的差异是十分必要的。本节在考虑地震环境的基础上对这两个差值作了进一步的研究。

以烈度概率分布曲线的形状参数 k 作为表征不同地区地震危险性差异的特征参数，通过对遍及全国和周边地区的 6 376 个点的地震危险性特征参数 k 值的分析，可将全国分为 I，II，III 3 个区，并编制了中国地震危险性特征区划图(草图)(李亚琦，1999)。

烈度 i 、地震影响系数 α_{\max} 及地震系数 K 的危险性曲线分别如下：

$$\lg[-\ln(1-P)] + 0.977\,3 = k\lg\left(\frac{12-i}{12-I_0}\right) \tag{1}$$

$$\lg[-\ln(1-P)] + 0.977\,3 = k\lg\left(\frac{0.85 - \lg\alpha_{\max}}{0.85 - \lg\alpha_{\max}^{10}}\right) \tag{2}$$

$$\lg[-\ln(1-P)] + 0.977\,3 = k\lg\left(\frac{0.50 - \lg K}{0.50 - \lg K_{10}}\right) \tag{3}$$

式中， P 为相应的超越概率值； k 为形状参数，根据对上述 6 376 个地点的地震危险性分析结果给出，再经过统计和归类后分别得到 I，II，III 区的形状参数 $k=6, 10, 20$ ； $I_0, \alpha_{\max}^{10}, K_{10}$ 分别为与超越概率 10% 对应的基本烈度、地震影响系数及地震系数。

根据这个结果再对我国现有的全部 1 905 个城镇计算它们的常遇地震和罕遇地震的地

表 1 抗震设计类别的建议

设防地震动水平 (50 年 10%)	使用功能分类			
	(四)	(三)	(二)	(一)
0.05	B	A	A	A
0.10	C	B	B	A
0.15	D	C	B	A
0.25	E	D	C	B
≥0.40	E	E	D	B

3.1 考虑地震环境的设计常遇地震和罕遇地震的确定

目前我国现行抗震设计规范 GBJ11-89 和即将实施的新抗震规范 GB50011，以“小震不坏，中震可修，大震不倒”作为抗震设计目标，并采用三水准二阶段的抗震设计思想来进行抗震设计；同时统一规定了“小震(常遇地震)”、“大震(罕遇地震)”的烈度与基本烈度之间的差值固定为 1.55 和 1 度。由于这两个值是在对我国华北、西北和西南地区 45 个城镇的地震危险性分析基础

震烈度、地震影响系数和地震系数值，再按这些城镇所在的地震危险特征区，统计这些区内的常遇地震和罕遇地震烈度、地震影响系数和地震系数值的平均值。以烈度为例，其计算结果见表 2，表 2a，b 分别给出了相应的大、小地震与中震的平均烈度差和地震影响系数和地震系数的结果。

表 2a 不同地震危险性特征区内“小震”、“大震”与“中震”的烈度差

烈 度 差		地震危险性分区			规 范 值 (GBJ11-89, GB50011)
		I 区(k=6)	II 区(k=10)	III 区(k=20)	
中、小震(63%)	平均值	-1.78°	-1.28°	-0.82°	-1.55°
	标准差	0.25°	0.20°	0.22°	
中、大震(2%)	平均值	+0.97°	+0.77°	+0.54°	+1.0°
	标准差	0.13°	0.10°	0.13°	

表 2b 不同地震危险性特征区内“小震”、“大震”地震影响系数 α_{\max} 及地震系数 K 平均值

参 数		6°			7°			8°			9°		
		I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区
α_{\max}	小震 本文计算值	0.024	0.049	0.064	0.058	0.097	0.128	0.144	0.202		0.40	0.466	
	(63%) 规范值 (GBJ11-89)		0.04			0.08			0.16			0.32	
	新规范 (GB50011)		0.04			0.08(0.12)			0.16(0.24)			0.32	
	大震 本文计算值	0.29	0.21	0.18	0.49	0.39	0.33	0.84	0.72		1.41	1.32	
	(2%) 规范值 (GBJ11-89)		0.25			0.50			0.90			1.40	
	新规范 (GB50011)					0.50(0.72)			0.90(1.20)			1.40	
K	小震(63%)	0.010	0.020	0.027	0.025	0.042	0.056	0.064	0.092		0.176	0.207	
	大震(2%)	0.124	0.088	0.076	0.214	0.170	0.146	0.373	0.322		0.628	0.586	

由表 2 可见，现行规范 GBJ11-89 和即将执行的新规范 GB50011 对地震烈度及地震影响系数的规定值与各分区内的实际计算平均值相差较大，这说明对属于不同分区的城镇采用现行规范的规定值进行“小震”下的强度验算和“大震”下的变形验算会产生一定的偏差，有时过于保守，有时偏于不安全。新规范 GB50011 虽然在 7°和 8°又细化了地震影响区域，但只是使基本烈度为 7°、8°时小震的结果比较接近本文按分区计算的结果，而当基本烈度为 6°、9°时的小震及所有烈度对应的大震结果均与实际计算结果有较大差异，因此，我们建议对不同的危险性分区采用不同的“常遇地震”和“罕遇地震”烈度、地震影响系数及地震系数，以便考虑不同地区地震环境的实际差异。

3.2 最优经济设防烈度的确定

合理设防烈度的决策是一个多变量、多目标、多约束的动态最优决策问题(谢礼立等，1996)，决策过程中如何考虑人员伤亡因素是十分复杂的，因此，本文提出了“最优经济设防烈度(地震动，下同)”和“最优安全设防烈度(地震动，下同)”的概念。所谓“最优经济设防烈度”是指不考虑人员伤亡问题，仅满足抗震投入与经济损失之和为最小所求得 的烈度；而“最优安全设防烈度”是指一方面满足投入与经济损失之和为最小，另一方面满足“人员伤亡人数≤社会可接受的水平”这一约束条件时所确定的设防烈度。本节先讨论最优经济

设防烈度的确定问题.

以“抗震投入+地震损失→最小”为目标函数进行决策分析就可确定“最优经济设防烈度”值,从而可以消除设防标准制定中的主观因素,给基本烈度(50 年超越概率 10%对应的烈度)找出合理依据,同时还可以考虑设防烈度的取值对未来可能的地震经济损失的定量影响,以达到通过对设防烈度的调整来控制未来地震经济损失的目的. 决策分析的目标函数为

$$S(I_d) = C(I_d) + LP(I_d) \tag{4}$$

$$LP(I_d) = \tau \cdot [L_1(I_d) + L_2(I_d)] \tag{5}$$

$$L_1(I_d) = \sum_{I_i=6^{\circ}}^{10^{\circ}} \sum_{j=1}^5 P(D_j | I_d, I_i) \cdot l_1(D_j) \cdot W \cdot P(I_i) \tag{6}$$

$$L_2(I_d) = \sum_{I_i=6^{\circ}}^{10^{\circ}} \sum_{j=1}^5 P(D_j | I_d, I_i) \cdot l_2(D_j) \cdot Y \cdot P(I_i) \tag{7}$$

其中, I_d 为设防烈度; $C(I_d)$ 为抗震投入; τ 为损失修正系数; $L_1(I_d)$ 、 $L_2(I_d)$ 、 $LP(I_d)$ 分别为建筑物或构筑物的直接经济损失、室内财产损失及总损失期望值; $P(D_j | I_d, I_i)$ 为震害矩阵; $l_1(D_j)$ 、 $l_2(D_j)$ 分别为各级破坏对应的直接经济损失比和室内物资损失比; D_j 为结构破坏等级, $j=1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌; $P(I_i)$ 为烈度发生概率; W, Y 分别为结构的工程造价和室内资产总值(马玉宏, 2000).

以北京市为例, 其最优经济设防烈度的决策结果见图 2. 可见, 投入损失和曲线最低点所对应的烈度 8° 是北京的最优经济设防烈度.

3.3 最优安全设防烈度的确定

对“最优安全设防烈度”进行决策需要解决的关键问题是在决策模型中如何建立目标函数或约束条件的问题. 也就是如何处理控制人员伤亡和确定设防标准两者之间的关系, 以便通过设防烈度的取值定量或半定量地控制未来地震的人员伤亡数, 为此, 本研究提出了社会可接受地震死亡率的概念. 所谓社会可接受地震死亡率是指某个城市或地区, 由将来可能发生的某次地震所引起的

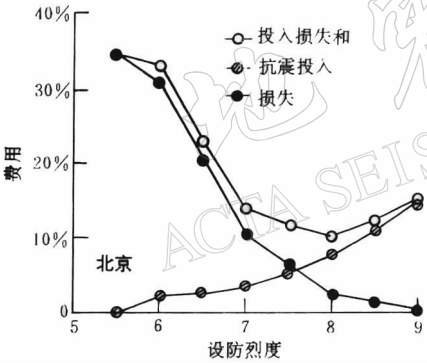


图 2 北京市最优经济设防烈度的决策

可以被社会接受的人员死亡率的最大允许值. 它是某个地区地震死亡率的控制值, 而不是该地区一次地震中人员死亡率的实际值.

抗震设防就其实质而言, 是一种风险管理, 确定可接受的风险水平是风险管理科学的基础工作之一, 制约于许多复杂的因素. 社会可接受地震死亡率就是一种风险水平. 考虑到不同的人群和社会对可接受地震死亡率可能有不同的观点, 可接受死亡率的确定最终需要由当地政府或灾害管理部门甚至立法部门的批准. 为了给人们更大的选择余地, 以便在制定基于性态的抗震设防标准时最大限度地满足业主和社会的需求, 本研究统计了国内外多年的各类交通事故、火灾以及各种自然灾害等造成的社会非正常死亡率数值, 并进行了社会问卷调查, 在此基础上, 提出了社会可接受地震死亡率的不同等级(马玉宏, 2000)(表 3). 表 3 中的数字表示可接受的死亡率, 即由于地震灾害引起的社会可接受的非正常死亡

人数和一个地区或城市的总人口数之比。

表 3 社会可接受地震死亡率等级

遭遇烈度	6	7	8	9	10	遭遇烈度	6	7	8	9	10
等级①	1×10^{-8}	2×10^{-8}	1×10^{-7}	5×10^{-7}	2×10^{-6}	等级⑥	2×10^{-5}	5×10^{-5}	2×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}
等级②	2×10^{-8}	5×10^{-8}	2×10^{-7}	1×10^{-6}	5×10^{-6}	等级⑦	1×10^{-4}	2×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	2×10^{-2}
等级③	4×10^{-8}	1×10^{-7}	4×10^{-7}	2×10^{-6}	1×10^{-5}	等级⑧	2×10^{-4}	5×10^{-4}	2×10^{-3}	1×10^{-2}	5×10^{-2}
等级④	2×10^{-7}	5×10^{-7}	2×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	等级⑨	1×10^{-3}	2×10^{-3}	1×10^{-2}	5×10^{-2}	2×10^{-1}
等级⑤	6×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	4×10^{-4}	3×10^{-3}	等级10	2×10^{-3}	5×10^{-3}	2×10^{-2}	1×10^{-1}	5×10^{-1}

在表 3 中，从等级①→等级10，可接受死亡率越来越大，即允许死亡的人数越来越多。当然，表 3 中给出的数值并不一定能被所有人接受，若在表 3 中还不能发现自己认为合适的可接受死亡率等级，人们可以直接给出自己认为合适的可接受死亡率数值，来确定较高或较低的抗震设防标准。一般来说，社会可接受地震死亡率等级还应与遭遇的地震烈度有关，烈度越高，死亡率也相应的提高，这一点在表 3 中也得到了体现。

在确定“最优安全设防烈度”时，决策分析的目标函数与公式(4)~(7)相同，但增加了“人员伤亡人数≤社会可接受的水平”这一约束条件，其表达式如下：

$$\begin{cases} RD_{I_d, I_{63}} \leq RD_{acc, I_{63}} \\ RD_{I_d, I_{10}} \leq RD_{acc, I_{10}} \\ RD_{I_d, I_2} \leq RD_{acc, I_2} \end{cases} \quad (8)$$

其中， $RD_{I_d, J}$ ($J=I_{63}, I_{10}$ 或 I_2) 为按烈度 I_d 设防的某类建筑在遭遇一次 J 烈度 (即对应 50 年内超越概率分别为 63%、10% 或 2% 时的烈度值) 的地震时的死亡率； $RD_{acc, J}$ ($J=I_{63}, I_{10}$ 或 I_2) 为遭遇一次 J 烈度地震时所对应的社会可接受死亡率，其取值见表 3。

公式(8)的意义是按烈度 I_d 设防的某类建筑，在遭遇小震 I_{63} 、中震 I_{10} 及大震 I_2 烈度时都保证其死亡率在社会可接受的水平之内。

在制定抗震设防标准时，首先根据目标函数为最小得到最优经济烈度，然后将其代入式(8)，看其是否满足不等式，若满足，则此烈度值即为最终确定的最优安全设防烈度值 (这一点在表 4 的结果中可以清楚地看出，如南京、大连、上海、北京等城市中，当可接受人员死亡率等级大于等级⑤时，它们的最优安全设防烈度基本是由最优经济设防烈度决定的)；若不满足，则选择使目标函数为次小时所对应的烈度代入式(8)，判断是否满足条件。依此类推，最终可以得到目标函数较小且满足约束条件的最佳设防标准。其决策过程见图 3。

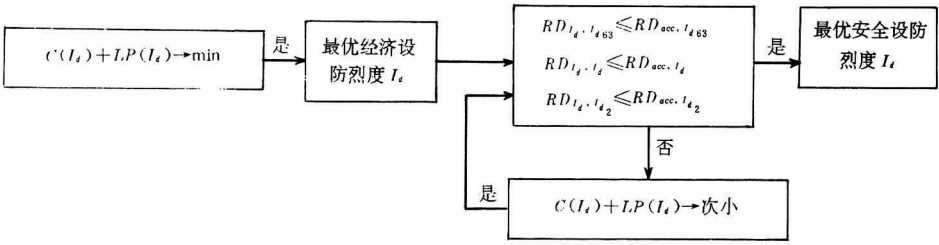


图 3 最优安全设防烈度决策分析模型

按烈度 I_d 设防的某类建筑在遭遇一次 J 烈度地震时的死亡率 $RD_{I_d, J}$ 的计算公式为

$$RD_{I_d,J} = f_t \cdot f_\rho \cdot \sum_{j=1}^5 P(D_j | I_d, J) \cdot l_5(D_j) \cdot P(J) \tag{9}$$

式中, $l_5(D_j)$ 为不同破坏状态对应的人员死亡率; f_ρ , f_t 分别为人口密度修正系数和发震时间修正系数; $P(J)$ 为烈度 J 发生的概率(马玉宏, 2000). 其它符号同前.

以哈尔滨、北京、南京、西昌等 9 个城市为例, 其最优安全设防烈度的决策结果见表 4. 可见, 对同一城市, 采用的可接受死亡率等级不同, 最优安全设防烈度也会不同, 基本的趋势是从等级①→等级 10, 最优安全设防烈度越来越小. 这说明可接受人员伤亡数对最优设防烈度的确定具有决定作用, 最优设防标准的确定仅考虑经济效益是不全面的. 在实际抗震设防中, 每个城市可以根据自己的经济条件和发展水平选择适合的可接受死亡率等级, 从而确定适合的最优安全设防烈度.

表 4 9 个城市的最优安全设防烈度

城市名称		哈尔滨	杭州	南京	大连	上海	北京	西安	西昌	天津
基本烈度		6°	6°	7°	7°	7°	8°	8°	9°	7°
最优经济设防烈度		5.5°	5.5°	7°	7°	7°	8°	8°	9°	7°
最 优 安 全 设 防 烈 度	可接受死亡率等级①	8	8	9	9	9	9	9	10	9
	可接受死亡率等级②	8	8	8	8	8	9	9	9	8
	可接受死亡率等级③	8	8	8	8	8	9	9	9	8
	可接受死亡率等级④	8	7	8	8	8	8	8	9	8
	可接受死亡率等级⑤	7	7	7	7	7	8	8	9	7
	可接受死亡率等级⑥	6.5	6.5	7	7	7	8	8	9	7
	可接受死亡率等级⑦	6.5	6.5	7	7	7	8	8	9	7
	可接受死亡率等级⑧	5.5	5.5	7	7	7	8	8	9	7
	可接受死亡率等级⑨	5.5	5.5	7	7	7	8	8	9	7
	可接受死亡率等级 10	5.5	5.5	7	7	7	8	8	9	7

4 建筑的重要性等级

建筑物按其重要性进行分类, 并确定其相应的设防等级是工程抗震设防工作的另一项重要内容. 国际上以及国内的通行做法是对不同重要性类别的建筑确定相应的重要性系数, 并将重要性系数直接乘以设防地震动值, 以提高或降低相应的设防地震荷载和相应的抗震措施. 由于重要性系数的确定主要是凭借经验, 因此, 很难定量说明考虑了重要性差别后结构到底提高了多少安全性, 也没有考虑结构所在地区的地震危险性差异, 从而体现不出真正的重要性含义. 为此, 本研究提出了对不同重要性类别的建筑采用调整设计基准期的方法来提高或降低其设防标准值的思想, 并探讨不同重要性建筑在不同危险性特征分区内、不同设防概率水准(常遇、偶遇、罕遇地震)下的设防烈度、地震影响系数及地震系数的合理取值问题.

4.1 不同重要性建筑的设计基准期

从某种意义上讲, 设计基准期不同, 意味着工程建筑的使用寿命期不同. 由于设防烈度或设防地震动是在一定的设计基准期内按一定的超越概率来取值的, 因此, 只要设计基准期或超越概率这两个参数中有一个发生变化都会引起设防烈度或设防地震动的变化. 而且这两者之间存在一定的关系, 改变设计基准期也意味着在基准期不变的情况下改变超越概率. 设防度或地震动值也自然随着变化, 而且设计基准期越长, 设防烈度或设防地震动值也随着增大. 由于设计基准期、超越概率与设计烈度(地震动)之间存在这样的关系, 使

我们可以采用不同的设计基准期来标度建筑物的重要性。较重要的建筑物可以赋予较长的设计基准期。

为了与现有抗震规范很好地衔接，本研究仍将建筑物划分为甲、乙、丙、丁 4 类，并通过分析给出不同重要性建筑的设计基准期(或设计使用寿命期) TL (马玉宏，2000)，见表 5。

表 5 建筑物使用寿命期的建议值

建筑重要性类别	使用寿命期 TL/a	重要性系数 φ	建筑重要性类别	使用寿命期 TL/a	重要性系数 φ
甲	200	4	丙	50	1
乙	100	2	丁	40	0.8

由表 5 可见，用建筑物的设计基准期或使用寿命期来定义重要性类别可以定量反映各类建筑重要性的差别，其重要性含义也能够很直观地体现，物理概念十分清楚。需要指出的是，表 5 中给出的设计基准期仅是为了说明如何应用它来标度建筑的重要性。在实际应用中，取多长的设计基准期或寿命期还应根据结构的类型和具体情况进行专门地研究。

应该指出的是，设计基准期是由国家建设行政部门统一规定的，一般不能随意改变，这里提出的改变设计基准期仅是用来标度结构的重要性，而不是真正地改变结构的实际设计基准期。下面的分析将会清楚地表明这一点。为方便计算和理解，我们将发生在 TL 年内复发周期为 $N \cdot TL$ 年地震的超越概率 P^φ 转换为在 $T_{\text{标}}(50)$ 年内发生同样复发周期 $N \cdot TL$ 地震的超越概率 P 值，二者间的关系为

$$P = 1 - (1 - P^\varphi)^{1/\varphi}$$

(10)

其中， φ 为结构重要性调整系数，等于设计基准期 TL 与 $T_{\text{标}}$ 之比，即 $\varphi = TL/T_{\text{标}}$ 。

表 6 不同设计基准期的设防地震
相当于 50 年内的超越概率 P

设防水准	重要性类别			
	甲	乙	丙	丁
常遇地震(TL 年 $P^\varphi=63\%$)	22%	39%	63%	71%
偶遇地震(TL 年 $P^\varphi=10\%$)	3%	5%	10%	12%
罕遇地震(TL 年 $P^\varphi=2\%$)	0.5%	1%	2%	2.5%

各类建筑在 $T_{\text{标}}(50)$ 年内发生常遇地震(TL 年超越概率 63%)、偶遇地震(TL 年超越概率 10%)和罕遇地震(TL 年超越概率 2%)的相当超越概率 P 值见表 6。如甲类建筑在 200 年内发生 63% 超越概率的常遇地震，则在 50 年内发

生同样大小地震的概率为 22%，其它则可类推。表中对应丙类重要性的数值也就是目前规范中对一般建筑物(丙类)规定的设防超越概率。

对甲、乙、丙和丁 4 种不同重要性类别的结构，表 6 的结果表示其相应常遇地震、偶遇地震和罕遇地震在 50 年内的超越概率值。

4.2 考虑地震环境的不同重要性结构抗震设防水准的确定

由于对不同重要性类别的结构，只是通过调整它们的设计基准期来确定相应的设防地震的超越概率，而不是直接规定它们的设计荷载，因此，同一重要性类别的结构，它们的设防地震的超越概率是相同的，但设防地震值则不一定相同，具体的数值要由结构所处的地震环境，也就是所在地区的地震危险性特征来确定。一旦建筑的重要性类别确定，则相应的设防地震的超越概率 P 可从表 6 获得，再将 P 代入危险性曲线公式(1)~(3)，即能求得给定重要性类别的建筑在 $T_{\text{标}}(50)$ 年内各种设防水准下的烈度、地震影响系数和地震系

数的值. 现以甲类建筑为例, 其计算结果见表 7. 可见, 所确定的各类结构的抗震设防水准考虑了结构所在地区的地震危险性差异, 克服了现行规范存在的弊端. 同时, 在对各类建筑进行抗震设计时, 可直接利用该表的计算值, 从而很好地与规范相衔接, 方便了设计.

5 结论

以我国为例, 针对目前国内外抗震设防标准制定中存在的问题和不足, 本研究提出了基于性态的三环节抗震设防方法, 得到以下结论:

1) 提出了结构抗震设计类别的思想和方法, 可以根据结构使用功能的要求确定相应的设防目标, 从而改进了过去抗震设计中以经济和安全为主要内容的设防原则和目标的做法, 有利于基于性态的抗震设计实现.

表 7 甲类建筑不同概率水准的设防烈度和设防地震动参数

地震危险性特征分区及 k 值	基本烈度 i	常遇地震($P=0.22$)			偶遇地震($P=0.03$)			罕遇地震($P=0.005$)		
		设防烈度	地震影响系数	地震系数 K	设防烈度	地震影响系数	地震系数 K	设防烈度	地震影响系数	地震系数 K
Ⅰ区 $k=6$	6°	5.1°	0.064	0.026	7.1°	0.257	0.109	8.4°	0.608	0.261
	7°	6.2°	0.136	0.059	7.9°	0.436	0.191	9.0°	0.900	0.395
	8°	7.4°	0.295	0.131	8.7°	0.753	0.335	9.6°	1.348	0.600
	9°	8.5°	0.656	0.291	9.6°	1.323	0.589	10.2°	2.046	0.911
Ⅱ区 $k=10$	6°	5.5°	0.083	0.035	6.7°	0.193	0.081	7.6°	0.350	0.149
	7°	6.6°	0.169	0.073	7.6°	0.343	0.150	8.3°	0.566	0.248
	8°	7.6°	0.352	0.156	8.5°	0.621	0.276	9.1°	0.928	0.413
	9°	8.7°	0.748	0.332	9.4°	1.145	0.509	9.8°	1.547	0.688
Ⅲ区 $k=20$	6°	5.7°	0.100	0.042	6.4°	0.153	0.064	6.8°	0.214	0.090
	7°	6.8°	0.198	0.086	7.3°	0.283	0.123	7.7°	0.373	0.163
	8°	7.8°	0.399	0.177	8.2°	0.531	0.236	8.6°	0.664	0.295
	9°	8.9°	0.822	0.365	9.2°	1.019	0.453	9.4°	1.204	0.536

2) 在确定小震、大震的设防烈度或地震动参数时充分考虑了不同地区的地震危险性差异, 对不同的危险性特征分区提出相应的常遇地震和罕遇地震动参数的建议, 这种作法更为科学合理, 可以平息近 20 年来我国抗震设计界对此引起的各种争议, 从而一方面避免了抗震投资的不必要浪费, 另一方面也消除了可能出现的不安全因素.

3) 综合考虑地震经济损失和人员伤亡因素, 并采用决策分析的方法来确定设防地震, 既能确保经济效益最优, 又能控制地震死亡率在社会可接受的范围内, 从而可以通过对设防烈度的调整来实现对未来地震经济损失和人员伤亡数量的控制. 提出的采用社会可接受地震死亡率等级来进行决策分析的方法, 可以使政府或有关决策部门能根据社会和经济发展的水平, 选择合适的可接受死亡率等级来确定本地区的最低抗震设防标准.

4) 提出了确定重要性系数的一种新方法, 即通过改变结构设计基准期的长短来决定其重要性系数, 这种方法物理概念明确, 工程应用合理. 此外, 研究了不同重要性建筑在不同危险性特征分区、不同设防水准下的设防烈度及地震动参数的取值, 方便工程设计使用.

综上所述, 本研究提出了一套完整的有关性态抗震设防的原则、方法和框架, 并给出了具体参数, 而且已经配套, 可以直接用来编制规范供设计人员使用.

参 考 文 献

- 高小旺, 鲍霁斌. 1989. 抗震设防标准及各类建筑物抗震设计中“小震”与“大震”的取值[J]. 地震工程与工程振动, 9(1): 58~66
- 李亚琦. 1999. 中国地震危险性特征区划[D]: [学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 18~29
- 马玉宏. 2000. 基于性态的抗震设防标准研究[D]: [学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 78~127
- 谢礼立, 张晓志, 周雍年. 1996. 论工程抗震设防标准[J]. 地震工程与工程振动, 16(1): 1~18
- 谢礼立. 2000. 基于抗震性态设计思想的抗震设防标准[J]. 世界地震工程, 16(1): 97~105

STUDIES ON PERFORMANCE-BASED
SEISMIC DESIGN CRITERIONXie Lili^{1, 2)} Ma Yuhong¹⁾

1) School of Civil Engineering & Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

2) Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China

Abstract: The seismic design criterion adopted in the existing seismic design codes is reviewed. It is pointed out that the safe-economy based seismic design criterion is no longer adequate to the requirements of nowadays social and economic development. A new performance-based seismic design criterion composed of three components is presented in this paper, which can not only efficiently control the economic losses and casualty, but also ensure the building's function in proper operation during earthquakes. The three components are: classification of seismic design for buildings, determination of seismic design intensity and/or design ground motion for controlling seismic economic losses and casualties, and determination of the importance factors in terms of buildings service period. For controlling the seismic economic losses and life losses, the idea of social acceptable casualty level is presented and the "Optimal Economy Decision Model" and "Optimal Safe Decision Model" are established. Finally, a new method is recommended for calculating the importance factors of structures by adjusting structures service period on the base of more important structure with longer service period.

Key words: performance-based design; seismic design criterion; seismic design intensity (ground motion); seismic hazard characteristic; seismic vulnerability analysis; earthquake loss estimation; acceptable level for earthquake human mortality