

地震安全性评价 技术教程

胡聿贤 主编

DIZHEN ANQUAN XING
PINGJIA JISHU
JIAOCHENG

地震出版社

地震安全性评价技术教程

胡聿贤 主编

地震出版社

内 容 提 要

本教程共分4篇23章。第一篇为总则,其余3篇按地震地质、地震、工程地震三个学科依次编排。总则阐述了地震安全性评价工作的意义、内容及工作要求。为了帮助读者了解并熟悉工程抗震设计规范,总则列举并分析了建筑、构筑物、公路、铁路、核电厂等行业的抗震设计规范。地震地质篇较为详细地论述了地震地质构造调查,地震区带和潜在震源区划分,地震地质灾害评估和地震地质灾害小区划等几方面的工作。地震学篇介绍了区域和近场地震活动性分析,确定性和概率性地震危险性评定以及地震区划方法。工程地震篇从地震动的工程特征开始,介绍了地震动衰减、人造地震动、场地相关地震动参数确定以及地震动小区划等,这部分内容是地震与工程的切入口,也是地震安全性评价工作的重要环节。

本教程可作为地震安全性评价工作培训教材,亦可作为从事相关研究的参考书。

地震安全性评价技术教程

胡聿贤 主编

责任编辑:许晏萍 蒋乃芳

责任校对:李 珺

*

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 24.75印张 630千字

1999年9月第一版 1999年9月第一次印刷

印数 0001—3000

ISBN 7-5028-1623-2/P·987

(2071) 定价:60.00元

编者的话

1998年3月1日开始施行的《中华人民共和国防震减灾法》明确指出：“重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程，必须进行地震安全性评价；并根据地震安全性评价的结果，确定抗震设防要求，进行抗震设防。”还规定，由国务院地震行政主管部门负责对地震性安全评价结果的审定工作。为了更好地担负起法律赋予中国地震局的职责，严肃认真地做好地震安全性评价工作，为建设工程场地提供科学、准确、可靠、合理的抗震设防要求，在中国地震局预测预防司的直接领导下，由《地震安全性评价工作规范培训教材》（初稿）的编写组人员对原教材进行了认真仔细的审定和修改，并重新定名为《地震安全性评价技术教程》正式出版。希望本教程在对从事地震安全性评价人员的培训中更好地发挥作用，对提高地震安全性评价工作水平有所帮助。

《地震安全性评价技术教程》与原教材相比，除了对表述不够准确贴切的内容进行修改补充外，基本维持原貌。对原教材中出现的文字、图表方面的错误进行了一一改正。相信具有一定地震学、地震地质学和地震工程学基础理论的相关行业人员，通过学习本教程，能基本掌握地震安全性评价工作的全过程。

本书由胡聿贤任主编，参加编写的人员有：胡聿贤（第一、二、十八、十九章），张裕明（第四至十章），时振梁（第十三至十七章），朱海之、袁晓铭（第十一、十二章），冯启民（第三、二十一章），赵凤新（第二十章），李小军（第二十二章），陈汉尧（第二十三章）。

目 录

第一篇 总 则

第一章 工程地震与地震安全性评价	(1)
1.1 工程地震与地震安全性评价在地震工程中的作用	(1)
1.2 抗震设计与抗震设防标准	(3)
1.3 抗震设计与设计地震动	(6)
1.4 一般工程与特殊重大工程的设计地震动参数	(6)
1.5 地震区划与设计地震动参数	(10)
1.6 地震安全性评价工作的内容	(10)
第二章 现行抗震设计规范有关工程地震的规定	(12)
2.1 《建筑抗震设计规范 (GBJ 11-89)》	(12)
2.2 《构筑物抗震设计规范 (GB 50191-93)》	(21)
2.3 《水工建筑物抗震设计规范 (SDJ 10-78)》	(23)
2.4 《公路工程抗震设计规范 (JTJ 004-89)》	(24)
2.5 《铁路工程抗震设计规范 (GDJ 111-87)》	(27)
2.6 核电厂抗震设计规范	(27)
2.7 地下直埋管道	(31)
第三章 工程场地地震安全性评价分级	(33)
3.1 工程抗震的设防标准	(33)
3.2 地震安全性评价工作和工程抗震设防标准的关系	(36)
3.3 各级工程场地地震安全性评价工作的要求	(41)

第二篇 地震安全性评价中的地震地质问题

第四章 地震地质概述	(43)
4.1 研究对象	(43)
4.2 研究方法	(43)
4.3 地位和作用	(44)
第五章 区域地震构造	(49)
5.1 研究内容	(49)
5.2 区域地震构造图的编制	(49)
5.3 区域大地构造单元划分图和新构造图的编制	(51)
5.4 地球物理场和地壳结构图的编制	(57)
5.5 地震构造条件的综合分析	(57)
第六章 地震区、带划分	(65)
6.1 地震区、带划分的含义和作用	(65)
6.2 划分地震区、带的基础和依据	(68)

6.3	地震区、带划分实例——华北地震区的划分	(69)
第七章	近场活动构造调查	(74)
7.1	主要断层的活动性鉴定	(74)
7.2	第四纪地质和地貌调查	(92)
7.3	近场地震构造图的编制	(93)
第八章	场区能动断层鉴定	(95)
8.1	能动断层的定义和规定	(95)
8.2	能动断层与活动断层的区别	(96)
8.3	鉴定内容和方法	(98)
8.4	能动断层鉴定实例	(99)
第九章	地震构造区(弥散地震区)划分	(109)
9.1	地震构造区含义和划分依据	(109)
9.2	地震构造区划分实例	(112)
9.3	地震构造区内最大潜在地震的评价	(113)
9.4	地震活动断层分段	(120)
第十章	潜在震源区划分	(130)
10.1	研究简史	(130)
10.2	潜在震源区的定义	(131)
10.3	划分潜在震源区的原则和步骤	(132)
10.4	潜在震源区的方向和范围	(132)
10.5	潜在震源区的震级上限	(147)
10.6	潜在震源区分档及其划分依据	(149)
10.7	潜在震源区的分等	(149)
10.8	几个术语的含义及其相互关系	(152)
第十一章	地震地质灾害的评价	(154)
11.1	研究地震地质灾害的意义	(154)
11.2	大震地质灾害实例分析	(155)
11.3	地震作用下的地质灾害类型	(160)
第十二章	地震地质灾害小区划	(167)
12.1	地震地质灾害小区划国内外研究情况	(167)
12.2	地震地质灾害区划中资料的收集	(169)
12.3	地震地质灾害区划图的编制原则与方法	(170)

第三篇 地震安全性评价中的地震问题

第十三章	区域地震活动性	(174)
13.1	概述	(174)
13.2	地震资料的整理和分析	(175)
13.3	地震活动时空特征分析	(179)
第十四章	近场地震活动性	(194)

14.1	概述	(194)
14.2	近场地震活动性分析	(195)
14.3	近场地震精确定位	(198)
14.4	近场地震震源机制	(201)
第十五章	最大历史地震法与地震危险性评定的确定性法	(205)
15.1	概述	(205)
15.2	最大历史地震法	(205)
15.3	地震危险性评定确定性法的地震动参数的综合评定	(211)
第十六章	地震危险性评定的概率方法	(215)
16.1	概述	(215)
16.2	基本烈度和地震危险性评定	(215)
16.3	地震危险性评定方法	(217)
16.4	地震危险性评定概率方法	(219)
16.5	我国地震危险性评定原则和技术途径	(222)
16.6	基础资料收集、整理和分析	(224)
16.7	地震带划分及其地震活动性参数评定	(225)
16.8	潜在震源区划分及其地震活动性参数评定	(234)
16.9	地震危险性分析计算	(238)
16.10	不确定性校正	(239)
16.11	地震危险性分析结果的表述	(241)
第十七章	区域性地震区划	(244)
17.1	概论	(244)
17.2	区划编图原则和方法	(245)
17.3	技术要点	(248)
17.4	结果的不确定性分析和结果的表述	(253)

第四篇 地震安全性评价中的工程地震问题

第十八章	地震动的工程特性	(257)
18.1	前言	(257)
18.2	震害经验与强震观测结果	(257)
18.3	地震烈度	(260)
18.4	地震动的工程特性	(263)
18.5	地震烈度与地震动的关系	(274)
18.6	小结	(281)
第十九章	衰减关系	(282)
19.1	地震波的产生和衰减	(282)
19.2	衰减关系的理论模型和理论方法	(283)
19.3	基础资料	(288)
19.4	地震烈度的衰减关系	(289)

19.5	地震动峰值的衰减	(293)
19.6	地震动反应谱的估计	(302)
19.7	地震动过程 $a(t)$ 强度包络函数 $f(t)$ 与持时 T_d	(308)
19.8	缺乏强震观测记录地区的地震动衰减关系	(313)
19.9	非基岩场地的地震动衰减关系	(318)
19.10	几个重要问题	(319)
第二十章	人造地震动	(321)
20.1	用途	(321)
20.2	几种地震动合成方法	(321)
20.3	人造地震动要求满足的条件	(322)
20.4	常用方法的步骤	(324)
20.5	强度包线与相位	(327)
20.6	改进的幅值谱调整法	(330)
20.7	考虑相位的调整法	(335)
20.8	多阻尼反应谱的拟合	(339)
20.9	数据的匹配	(341)
第二十一章	场地工程地震的地质条件	(343)
21.1	场地勘察的基本要求	(343)
21.2	场地波速及其测量	(343)
21.3	场地土动力性能及其测定	(349)
第二十二章	场地地震动参数的确定	(355)
22.1	场地地震动参数确定方法的基本思路	(355)
22.2	场地重要影响的震害经验	(356)
22.3	抗震规范中考虑场地影响的方式	(356)
22.4	场地地震反应的一维分析及计算程序框图	(358)
22.5	场地反应二维分析及计算程序框图	(368)
22.6	场地地震反应分析相关的问题	(374)
22.7	几个问题的说明	(377)
第二十三章	地震动小区划	(380)
23.1	前言	(380)
23.2	地震动小区划的进展	(380)
23.3	地震动小区划的步骤	(385)
23.4	地震动小区划与抗震规范的关系	(387)

第一篇 总 则

第一章 工程地震与地震安全性评价^①

1.1 工程地震与地震安全性评价在地震工程中的作用

地震学研究与地震有关的科学问题,包括:地震成因、震源力学、地震波及其在地球介质中的传播、地震发生的规律、地震预报、地震灾害与对策和工程地震等。仅就直接为社会减灾服务而言,它至少有三方面的内容,即:地震预报、地震工程和地震社会学。短临地震预报的主要目的在于减少人身伤亡和启动应急救援对策;中长期地震预报的目的则在于为地震工程和社会减灾提供设防标准。

顾名思义,地震工程考虑地震危害性的工程问题,它可以分为工程地震和工程抗震两个方面。

工程地震以中长期地震预报结果为依据,提供一个工程或地区在其设计寿命中可能遭遇的地震危险,作为工程抗震的设防标准或依据,以保证工程的安全性。对于一般工程,这一结果以全国或大区的地震区划图的形式给出;对于单项重大工程,需要以具体工程场地的地震安全性或危险性的形式给出;对于面积较大的大中城市、经济开发区、或铺设线长或占地面广的生命线工程,则应以地震小区划的形式给出。抗震设防标准由法规性的文件加以规定,如全国地震烈度区划图和经过审查批准的专项文件,以及有关工作规范或规定。

工程抗震设计,则应用结构地震反应分析估计工程的抗震能力,再按照给定的抗震设防标准进行工程抗震设计。工程抗震设计规范是工程抗震设计的法规性规定。

地震社会学研究的是地震引起的社会问题,本应是与地震工程学并列的一个学科分支,但由于其发展晚于地震工程学半个世纪,又由于重要的地震社会问题多由工程震害所引起,故地震工程学与地震社会学两者的科学技术活动常合并进行,甚至有不少人认为地震工程学也包括地震社会学与社会地震学。社会地震学研究的是与社会有关的地震学,它包括地震预报与工程地震学;而地震社会学则包括震害预测与抗震减灾,其中震害既包括经济损失,又包括人身伤亡,还可以包括社会地震学。上述关系可以简略地用图 1.1.1 表示。

地震工程学与地震社会学密不可分的原因还有两个,第一,广义而言,工程问题也是社会问题,社会损失主要由工程震害所引起;第二,这两个问题都可以用下述公式表示其主要内容:

$$\text{灾害(RSK)} = \text{危险度(HZD)} \times [\text{抗灾能力(VUL)} \\ \times \text{损伤(LS)} \times \text{社会环境(SOC)}], \quad (1.1.1)$$

这一公式不仅可以包括工程与社会(其破坏足以引起灾害的自然环境、工程及社会环境,又常合称为承灾体),还可以包括地震以外的其它灾种。式中灾害(damage, risk)表示某一灾

^① 胡聿贤执笔。

种（地震、风、洪水或其他）引起的社会总损失；危险性或危险度（hazard）表示某一灾种的可能大小或设防所采用的标准值（如地震烈度或地震动加速度、速度、反应谱或其概率），对将兴建的工程而言，即为抗震设防标准，它与当地地震环境有关，其大小的选择取决于设防水平；方括号的下标 i 表示社会环境的第 i 个项目（如某一种房屋、地下管线，或某一种社会组织关系，如抗震减灾组织系统、石油生产线）的内容；抗灾能力（vulnerability）在学科上称为易损性，即某一项目抗御灾害的能力，一般可以表示为在各种地震烈度或地震动下的各种破坏程度的可能性或概率，它通常用矩阵形式表示，故称破坏概率矩阵。损伤（loss）常用双指标，即在工程或社会的各种破坏程度下的伤亡人数和经济损失。社会环境（society）是社会自然和人为环境财富的总称，其中包括硬财富，如工程和土地，也包括社会组织功能和系统。

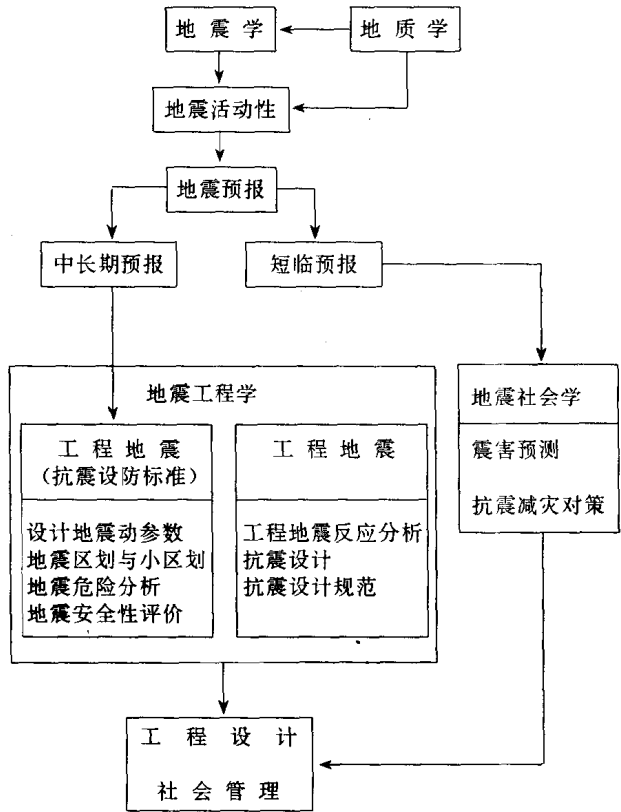


图 1.1.1 工程地震与地震工程和地震社会学的关系

式 (1.1.1) 不仅可以用来估计灾害损失，还可以用来表示工程抗震设计和抗震鉴定加固等减灾措施决策。如根据损失估计，可以选择更适当的抗震设防标准，从而调整工程社会系统抗震能力，以得到可以接受的损失程度；对于已有社会环境项目，可以根据其现有抗震能力，估计其可能的损失，从而决定是否要加固；对于一个地区或社会，可以进行各社会环境项目的震害预测，发现社会环境中的薄弱项目，决定提高其抗震能力的先后顺序。社会中自然环境抗灾能力的改变，有时可以对某个灾种的危险度有重大影响，如兴建大型水库有可能诱发地震，从而增加地震危险度；改善自然植被环境，可以减轻洪涝灾害。上述这些关系可以用线图在公式中表示。

式(1.1.1)认为各社会环境项目之间相互独立无关,所以,此式是线性的;但在现代社会中,社会环境项目之间相互影响强烈而复杂,各项生产系统之间相互依存,供销关系链形成复杂网络,需要用非线性的关系代替上述线性关系,即在上式中引入一些求积号 Π ,从而引入下述这样的因子:

$$RSK_i(RSK_j) \quad \text{或} \quad P(RSK_i) \times P(RSK_j) \quad (1.1.2)$$

其中,圆括号表示函数关系。

这一节的目的在于指明:工程地震问题指的主要是与抗震设防标准或地震危险性有关的问题。为此,除地震活动性外,还必须理解工程和社会对地震的要求,再以此为目的,根据地震中长期预报的方法,估计场地的地震危险度。更具体地说,第一,根据工程或社会的特点,首先决定用什么物理量来表示地震动。如对一般房屋的震害估计,可以采用地震烈度;而对房屋工程的抗震设计,则要给出地震动加速度和地震烈度;对于重大工程的抗震设计,就还要提出场地地震相关反应谱;对于地下直埋管线,则应给出地震动速度或地震动位移,由此导出地震时的地基变形;对于高耸或长跨等柔性结构,则要注意给出长周期反应谱或地震动速度或位移。第二,根据地震活动性和场地工程地质条件,给出场地的设计地震动参数的估计值,即抗震设防标准。对工程的理解,包括对一般工程抗震设计规范的理解,以及对特殊和重大工程的抗震设计规范的理解。此外,再加上对地震危险性分析的熟悉,才能对各种各样的设计地震动参数或抗震设防标准作出合理的科学的估计。

除地震危险性分析估计外,工程地震还包括另外一项重要工作,即场地地震地质灾害评价。场地地震动安全性评价和场地地震地质稳定性评价两者合起来就是工程场地地震安全性评价工作,也就是抗震设防标准主要内容。

本书以工程为主要对象,评价具体场地的工程地震问题称为工程场地地震安全性评价。

1.2 抗震设计与抗震设防标准

设计的目的是使工程在承受所考虑的荷载(如以力表示的工程结构物的自重,可移动物如车辆、货物、人等的重量)或作用(如以变形或运动量表示的温度、地震动等)下具有一定的安全性,因此,抗震设计会涉及到地震作用和工程或社会安全性两方面的问题。抗震设计中考虑的地震作用包含三方面的内容:第一,地震作用的大小或强弱;第二,所考虑地震作用的可能性(或概率)及其频繁程度(常遇或罕遇);第三,地震作用的动态特征。工程安全性包括工程达到何种安全程度为宜。下面分别介绍这些内容。

1.2.1 地震作用的强弱

地震作用的强弱过去大多是通过地震烈度(I)的大小来表示的(见第18.3节),在抗震设计中再通过近似的关系将烈度换算为设计地震动加速度(a ,或 a/g , g 为地球的重力加速度),如图18.5.3所示。现在,国内外的抗震设计都普遍接受反应谱理论,即认为地震动像声音一样,由不同而复杂的频率成分所组成。在反应谱理论中,还要求考虑反应谱随地震的大小、远近和工程所在场地的地质条件而改变形状大小。为了表示反应谱形状和大小的变化,至少要求用两个独立的参数来近似表示反应谱,一个参数表示反应谱大小,另一个参数表示反应谱的形状(如肥瘦和主要频段)。我国现行抗震设计规范就是这样的,如图2.2.1所示。

我们用加速度反应最大值 $\alpha_{\max} = \frac{a}{g} \beta_{\max}$ 表示谱的大小, 用特征周期 T_g 表示谱的肥瘦。这里 $\beta_{\max}$ 为高频部分反应谱的放大倍数。这种考虑反应谱和随地震大小远近和场地条件而变的反应谱, 是近几十年国际抗震理论发展的成果, 我国从 60 年代中起就处于国际领先的地位。它将原来认为地震作用只是一个仅有大小强弱之分的静力理论, 发展到必须考虑地震作用动态特征的动力理论。现在我国的抗震设计规范中所采用的地震烈度只和地震动加速度 ($k = a/g$ 或 $\alpha_{\max}$) 有关, 而与频谱 (如谱形参数 T_g) 无关, 这样, 抗震设计规范中的地震烈度几乎只是加速度的一个代名词。在日本, 无论是常用的地震烈度 (他们称为震度) 或近几年采用的一种烈度计, 也只是用地震烈度来作为地震动加速度或速度的代名词而已, 实际上是与频谱形状无关的。

很早以前, 有人建议过用三条直线来近似表示反应谱, 这三条直线分别表示地震动加速度、速度和位移, 现在仅采用地震加速度和特性周期 ($T_g \approx \text{速度}/\text{加速度}$ 比值) 这两个独立参数, 是三个独立参数的进一步简化。

1.2.2 地震作用的概率估计

对于发生与否有很大不确定性的事件, 人们常用概率来表示其发生的可能性大小, 地震就是这样的事件。虽然人们对地震发生的时、空、强的规律已经有了许多认识, 如强烈地震 (如震级大于 7 者) 大多发生在地质构造近代很强烈的构造带上, 如我国华北的郯庐地震带、世界上的环太平洋地震带等等, 但是这些构造带的范围常宽达几十公里以上, 长达几百、上千公里, 而发生地震的震级在 6~8.5 之间, 发生时间可能在几十年内、也可能在几百年以后, 震级在 8 以上的地震在一个有限的地区范围内, 甚至在上千年后。对于工程设计而言, 这样粗略的估计, 或者说这么大的不确定性是不同于它所考虑的其他荷载的, 如风、雪、洪水等等。但是, 从当前的地震学知识来看, 要想确定地说“距某工程场地 50km 之内, 在今后 50 年内一定会发生至少一次 7.5 级的地震”是不大可能的事; 比较科学的说法是: 发生上述地震或更大地震的概率不会超过 10%。后一种说法比较接近于当前地震学家的认识水平。在这种情况下, 工程抗震设计就不可能像桥梁设计那样, 把桥梁上布满车辆时所谓最大可能的荷载作为最大设计荷载, 而只能给出某地今后 50 年内发生超过Ⅶ度或超过加速度 0.1g 的可能性不超过 60%, 超过Ⅷ度或 0.2g 的可能性不超过 10%, 超过Ⅸ度或 0.4g 的可能性不超过 2%, 等等。当然给出这些量的同时, 还可以给出与之相应的反应谱或其他地震动量。在工程设计中可以和抗震设计相比拟的例子是洪水, 如 500 年或 1000 年一遇的洪水, 设计地震动也可以用多少年一遇的方式来表示, 如上述 50 年 60%、10% 和 2% 大体相当于 80 年、500 年和 1000 年一遇。

1.2.3 地震作用的动态特征 (参见第 18.4 节)

地震动态作用的完整描述是: 在三个平移和三个转动方向上各自的地震动加速度时程 $a(t)$ 。这是一种理想, 目前还无此可能。对于特别重要的工程, 如核电厂, 其抗震设计规范中才规定应该采用三个平移方向的地震动时程作为设计地震作用, 对于特别重要的高楼和特大桥梁, 一般则只要求考虑一个或两个方向的地震动时程。

由于按地震动时程进行工程结构的动力分析是一项复杂而费时的的工作, 所以对于一般工程, 都采用简化了的动力分析方法, 即反应谱法。现在看来, 抗震设计对地震动的进一步要求是考虑反应谱的变化因素, 并进一步用简化方式考虑地震动持续时间的影响。

1.2.4 工程安全性或抗震设计标准

这一问题包括两个方面：第一，如何判断或定义工程的抗震安全性；第二，如何选择适当的安全性，以得到安全与经济之间的平衡。

地震安全性的定义在近几十年内有了变化。开始人们只注意到地震时的人身安全，以工程结构是否破坏作为安全的唯一要求，即要求在结构的各构件设计中满足下式：

$$f_1 + f_2 \leq f_0 / \mu$$

式中， f_1 与 f_2 分别是由常见荷载（如自重、室内货物、桥上车辆等）和地震作用引起的构件中的内力； f_0 为此构件的强度； μ 为安全系数，一般略小于 2。

但近几十年，人们对地震安全性的要求已从单纯的人身安全发展到工程功能安全的概念，简单地说，即要求所设计的工程在常遇（使用期内可能遇到几次）的小震下，工程基本无损，无需修理即可继续使用；在难得一遇的中震下，经修理后仍可继续使用；而在不大可能遭遇的特大地震下，可以容许工程破坏，但仍不倒塌，以保证人身安全，地震后此工程可能报废；即所谓小震不坏、中震可修、大震不倒的功能要求。我国现行抗震设计规范就采用此原则，与小、中、大震的地震动相应的超越概率分别为 50 年内 60%、10% 和 2%，即 80 年、500 年和 1000 年一遇的地震动。

小震不坏、中震可修、大震不倒这样的安全要求是当前国际常用的标准。按此标准选定设计地震动的大小，以求得安全与经济的平衡，在原则上十分合理，但难以用定量分析导出其数值，主要困难在于各使用阶段的经济损失难以计算。为此，人们大多用经验性的方法来决定小、中、大震的超越概率的取值。现以我国现行的抗震规范为例说明如下。

在七八十年代，我国规范只采用一个中震，其大小由规范制定者和地震工作者按经验确定。当时的抗震设计规范有两个要求，即在给定的地震动下，进行强度和形变两项验算，如在Ⅷ度地区，其对应的地震加速度为 $k=a/g=0.3$ ，在强度验算时，设计地震动取为 Ck ， $C \approx 1/3$ ，故 $Ck=0.1$ ，按此进行强度设计；在验算结构变形时，要求在地震动为 $k=0.3$ 下的变形满足安全要求。这一方法可以归纳如下：

在地震动 $k=0.1$ 时，满足强度要求，保证结构不坏；

在地震动 $k=0.3$ 时，满足形变要求，要求结构无严重破坏。

90 年代后，日本和我国抗震设计规范均明确要求按两级地震动进行设计，如我国规范要求：

在地震烈度为 $I-1.55$ （小震）或地震系数为 $k/3$ 时，进行强度校核，要求结构不坏；在地震烈度为 I （中震）或地震系数为 $k=a/g$ 时，自动满足中震可修；在地震烈度为 $I+1$ （大震）或地震系数为 $(4 \sim 6) \times k/3$ 时，进行形变验算，要求结构不倒塌。

上述小、中、大震的定义，又被解释为其超越概率分别为 50 年内 63%、10% 和 2%~3%。这三种定量的定义（即烈度差、地震系数和超越概率）在全国范围内大致可行，但是这种差别会因地区、因烈度高低而可能有很大的变化。例如在我国不同地区内，按超越概率定义的小、中震的烈度差可能在 0.5 至 2.5 度，中、大震之差可能在 0.5 至 2 度之间。对于一般工程，这种近似的简单处理是可行的，对于特殊的、重大的工程则需慎重。

真正的、定量的安全与经济的综合分析，目前尚未见应用于抗震设计规范的具体分析中。

1.3 抗震设计与设计地震动

工程抗震设计包括抗震构造措施和抗震计算分析两个方面。

抗震构造措施以经验为主,根据经验提出一些关于工程构造上的规定。一类规定是对总体的要求,如要求房屋体形规整和整体性强,要尽量避免容易在强地震作用下产生突发性的脆性破坏,要尽量设置多道抗震防线,要尽量选择稳定均匀的建设场地;另一类规定是关于细节的,如房屋层高、圈梁与构造柱的设置、钢筋的布置与连接等等。这些结构构造措施的抗震能力难以定量计算,其正确性与有效性来自震害现场的经验和教训,多数是经过定性分析或试验证明有效的。

计算分析以结构动力反应分析为主,也包括试验分析,其结果既符合数理力学原理,又符合震害经验教训,并以规范的形式给出法定的计算方法。按照规范规定,就可以确定部件的尺寸和配筋,以确保所要求的抗震能力。一般工程的震害经验多,抗震设计就以构造措施为主;特殊工程的震害经验少(当然,也应符合一些通常都要满足的原则),抗震设计则以计算和试验分析为主,又由于这些工程的重要性很高,计算方法还应该是先进而又保守的。

工程的抗震设计分析需要以给定的设计地震动参数为依据(见第二章)。最简单的设计地震动参数包括地震动峰值加速度和反应谱;在一般工程的抗震设计规范中,规定的是地震动峰值加速度和标准反应谱,即不随地震环境而变的反应谱;对重大工程,则应采用随地震环境而变的场地地震相关反应谱。最详细的设计地震动参数包括很多参数,如场地地震相关反应谱(其中隐含了峰值加速度、速度和位移)和地震动强度包络函数 $f(t)$ (其中隐含了强震动持续时间),有时还要求地震动加速度过程 $a(t)$ 。随着工程的重要性、特殊性和复杂性的增加,设计地震动参数和计算分析方法也要求逐渐详细复杂,有时甚至还要求进行模拟地震动的动力试验,这时,也需要一组地震动加速度过程。如我国现行《建筑抗震设计规范(GBJ 11-89)》第4.1.2条规定:“特别不规则的建筑、甲类建筑和表4.1.2所列高度范围的房屋建筑,宜采用时程分析法进行补充计算。”这里所说的时程分析法就是按给出的地震动加速度过程 $a(t)$,逐步计算结构的地震动力反应。此法也称为动力分析法。

总之,设计地震动参数是工程抗震设计两个要求之一的计算分析的依据。工程抗震设计的另一要求,即抗震构造措施,通常是根据地震分区规定的,地震分区可以是地震烈度分区,也可以是地震动分区。这种分区和设计地震动更详细的规定都属于抗震设防标准。

1.4 一般工程与特殊重大工程的设计地震动参数

工程对设计地震动参数的具体要求随工程的重要性程度而异。这种差异表现在以下四个因素对设计地震动参数影响的处理方式,即:哪些参数,其超越概率,地震环境,场地工程地质条件。

1.4.1 工程重要性的差异

表1.4.1中列举了一般工程与重大工程的一些差异。就中国而言,每年建造的一般房屋可达几十万栋之多,量大面广;而核电厂或三峡大坝那样的重大工程,则几年甚至几十年才有可能建造一座。一栋房屋的震害后果一般可能涉及几十人的生命财产,而一座核电厂或三

峡大坝的震害则可以使几个县甚至几个省的几十万至几百万人民的生命财产受到不可估计的长期的巨大损失。这些区别说明，重大工程应该采用更加安全的抗震设防标准。另一方面，人们对一般房屋有丰富的震害经验，按此经验设计，已可保证一定的安全性；而核电厂在世界范围内也不多，虽然出现过一些事故，大都由于人为错误，而非地震所致，就地震而言，尚无成功经验或失败教训，故不能依赖于由一般房产外推至核电厂的经验，而必须依靠、补充或参考理论计算和试验分析的结果进行抗震设计。因此，从抗震设计技术上说，就要求采用先进而保险的数据、计算、试验和经验方法，综合地进行设计。另外，重大工程的前期工作和设计时间都较长，经费投入较多，有条件、有时间进行更详细更保险的地震安全性评价工作，即对地震环境进行更深入、更详细的了解，对可能产生的地震动特性与场地的地震影响进行更细致的分析研究，以确保安全。

表 1.4.1 一般工程与重大工程的差异

工程重要性	震害影响	例 子	抗震经验	设计工作期限
一 般	几人 几十万元	一般房屋 每年几十万栋	丰 富	几天至几个月
重 要	几十万人 几十亿元	核电厂 几年一座	极 少	几 年

1.4.2 设计地震动参数

前面说过，工程对设计地震动参数的要求，一方面与工程的重要性有关，另一方面又要考虑工程的特性。从繁简程度分，设计地震动参数从简单到详细的排序是：①地震烈度，由此换算地震动峰值加速度；②峰值加速度 a 或地震系数 $k=a/g$ 和标准反应谱或标准放大系数谱，标准谱一般不考虑地震环境，但可以近似地考虑场地工程地质条件的影响；③地震动峰值加速度 a 和峰值速度 v ，或等效峰值加速度 EPA 和等效峰值速度 EPV ，或其“等效对”：地震系数 k 和反应谱特征周期或拐点周期 $T_g=2\pi v/a$ 或 $2\pi(EPV)/(EPA)$ 。这几对值 ($a, v; EPA, EPV; k, T_g$) 都可以初步近似地表示随地震环境和场地工程地质条件而变的反应谱，即场地地震相关反应谱；④地震动峰值加速度 a 、峰值速度 v 和峰值位移 d ，或它们的等效值，这一组参数可以较好地近似表示反应谱，特别是在长周期部分；⑤上述参数再加上地震动持时或强度包络函数 $f(t)$ ；⑥地震动加速度过程 $a(t)$ ；⑦在特殊情况下，还要求近距离（几十至几百米）内的地震差动和地震动的相关性，三个相互垂直分量的地震动加速度过程，还可以包括绕这三个轴的转动。后面这几项目前还没有公认的成熟的估计方法。表 1.4.2 给出了一些事例。

表 1.4.2 各类工程对设计地震动参数的要求

工 程	一般房屋	超高层房屋、 储液罐	地下埋置管线	大跨度桥	核电厂
要 求	峰值加速度 a	长周期反应谱 a, v, d	地下变形 v	长周期反应谱 桥墩差动	一组时程 $a(t)$

1.4.3 设计地震动参数的选择标准

对一项具体工程选择多大的设计地震动参数,决定于对安全程度的要求。安全程度有时用超越概率来定量化,有时则根据经验和传统做法来选定,而不说明相应的超越概率值。我国《建筑抗震设计规范(GBJ 11-78)》和1977年第二代全国地震烈度区划图中规定的设计地震烈度,即无相应的超越概率值。对我国第二代地震烈度区划图中45个城市结果的分析认为,当时给出的地震烈度大致相当于50年10%或每年2‰的超越概率;高孟潭、韩伟1992年对我国第三代地震烈度区划图中7000多个场点结果的分析认为,全国地震烈度区划图给出的结果,与我国现行《建筑抗震设计规范(GBJ 11-89)》中的有关规定不完全恰当,需要进一步说明其间的关系。

1.4.3.1 小震、中震、大震

《建筑抗震设计规范(GBJ 11-89)》将我国第三代全国地震烈度区划图给出的50年超越概率为10%的烈度值定义为中震 I ,然后定义小震与大震,如表1.4.3。

表 1.4.3 规范 GBJ 11-89 小、中、大震的定义

地 震	烈 度	加速度	50 年超越概率
小	$I-1.55$	a	63%
中	I	$3a$	10%
大	$I+1$	$(4\sim6)a$	2%~3%

此规范要求,按小震进行弹性结构地震反应分析和强度设计,按大震进行非弹性结构地震反应分析和变形验算,达到小震不坏、中震可修和大震不倒的目的。表1.4.3中的数值是根据七八十年代之交时的研究结果确定的。

1.4.3.2 小震、中震、大震的概率和加速度

根据1992年的新数据,若按上述超越概率定义,小、中震和大、中震的烈度差将有不小的变化,变化范围因地区和烈度而异,大体如表1.4.4所示,表中大震超越概率取50年2%;若按上述烈度差定义,小震和大震的超越概率也有不小的变化,变化范围也因地区和烈度而异,大体如表1.4.5所示。

表 1.4.4 小、中震与中、大震的烈度差

地 区	烈 度	小、中震烈度差		中、大震烈度差	
		范围	平均	范围	平均
全国		0.3~2.8			
台湾		0.5~1.0	0.6~0.8	0.3~0.7	0.4
西北		1.0~2.5	1.3~1.5	0.4~0.9	0.5~0.6
西南		0.9~2.4	1.3~1.5	0.4~1.0	0.6~0.7
东部		0.5~2.8			0.6
东北		1.0~2.8	1.5, 2.2	0.5~1.0	0.6~0.7
	VI	1.0~2.6	1.4~1.6	0.5~1.0	0.6~0.9
	VII	1.6~2.8	2.2	0.5~0.9	0.7~0.8
华北华南		0.5~2.5			
	VI	0.5~2.2	1.4	0.3~1.2	0.6~0.8
	VII	1.0~2.4	1.6	0.3~1.2	0.6~0.8
华北	VIII	1.1~2.5	2.0	0.5~1.0	0.6~0.7

表 1.4.5 小、大震烈度 50 年超越概率值 (%)

地震	地区	全国	台湾	西北	西南	东北	华北	华南
小震	范围	52~99	93~99	52~92	52~92	52~92	52~92	52~92
	众值		99	72	72	67	72	7
大震	范围	0.3~1.9	0.3~1.9	0.3~1.9	0.3~1.9	0.3~1.7	0.3~1.9	0.3~1.9
	众值		1.9	0.5	0.5~0.7	0.5	0.5	0.5~0.9

由此可以看出以下几点结果：①上述数值在全国范围内有较大的差异；②与小震 $I-1.55$ 度相应的 50 年超越概率在 52% 到 99% 之间，以 72% 为最多，而不是 63%；③与大震 $I+1$ 度相应的 50 年超越概率在 0.3% 到 1.9% 之间，以 0.5%~0.7% 为主，远小于 2% 的规定值。了解这些差别之后，在尚未作出进一步的明确规定之前，就应该提出这两种结果，与设计者共同研讨如何选取。

1.4.3.3 工程重要性与超越概率

我国和国际趋向一样，对一般房屋，相当于中震的设计地震动加速度的超越概率均取 50 年 10% 左右；对于核电厂的大震，即极限安全地震动，则取年超越概率 0.1%，约相当于 50 年超越概率 0.5%。我国对特大坝如三峡大坝取年超越概率 0.2% 或 50 年 1%，对悬索桥有时取年超越概率 0.5%，约相当于 50 年 2.5%。由此可见，从一般房屋、特大桥梁、特大水坝到核电厂，重要性逐步加大，安全性要求逐步提高，采用的超越概率逐步减小，它们的比值约为 20:5:2:1。上述这些数值的选择，应该由有关工程部门按照有关抗震设防标准的规定，针对具体工程作出选择；在特别重要的情况下，也可由上级主管部门决定。由于工程的地震安全性的大小，除了直接影响业主之外，还会影响到公众生命的安全，业主亦负有维护社会安全之责，故政府对此应有一最低要求。

1.4.4 地震环境的影响

一般工程量大面广，无条件也无必要逐个工程详细研究其地震环境，可以只是根据全国地震区划图给出的地震烈度或设计地震动参数进行设计。全国地震区划图是针对全国这样大的面积进行的，目的在于为一般工程服务，因而对一个特定的地点而言，研究得可能不够详细。例如有些历史地震由于资料不全，研究不多，震中区可能确定得不当；又如有些潜在震源区的边界划分可能不够恰当。对于重大工程而言，就要求仔细考虑这些因素，以保证工程的安全。从原则上说，这项工作应该仔细研究下列因素：对场地有影响的历史地震的定位与震级，有影响的潜在震源区的详细划分及其地震活动性参数的数值，适用于本地区的地震衰减关系，以及场地条件对地震动的影响。由于研究的深度不同，所得的结果自然可以不同于全国地震区划图。一个明显的例子是，这一工作应该适当考虑地震的大小远近的影响，从而给出更适当的设计反应谱，即场地地震相关反应谱，它完全可以不同于规范中规定的标准反应谱。

1.4.5 场地条件的影响

一般工程在采用全国地震烈度区划图时，对场地工程地质条件的影响采用了简化的场地分类的方式，即：①认为全国地震烈度区划图给出的是所谓的“平均场地”，即 II 类场地；②如我国现行建筑抗震规范那样，将场地简化为如下的四类（I~IV），按这四类给出不同的标