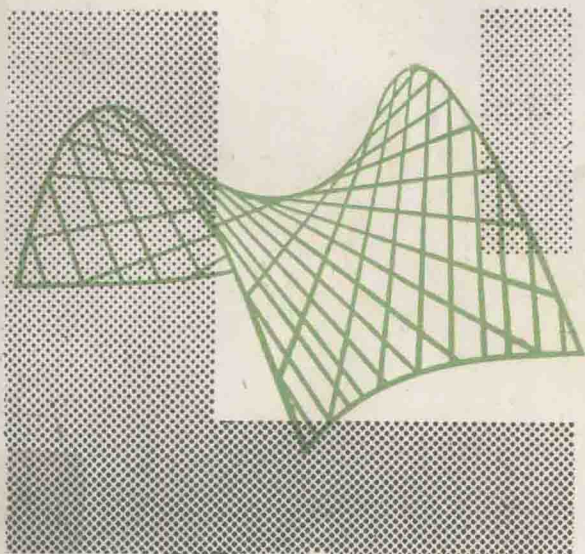


高等学校教学用书

建筑结构 抗震设计

东南大学 高振世 朱继澄 唐九如 何达 编著
清华大学 张良铎 陈聃 主审

● 中国建筑工业出版社



高等学校教学用书

建筑结构抗震设计

东南大学

高振世 朱继澄 唐九如 何达 编著

清华大学

张良铎 陈聃 主审

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书根据全国建筑工程学科专业指导委员会建议的工民建专业本科《建筑抗震设计》课程基本要求,按照《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)以及1993年局部修订进行编写。目的作为大学本科的必修课和选修课教材使用。编写时参照了作者曾编写的原高等学校试用教材《建筑结构抗震设计》的内容安排,并考虑了目前的发展和作者的教学科研经验,以便更结合教学和实用的需要。

书中首先介绍抗震设计基本知识、抗震设计基本要求、地基与基础的抗震设计问题,进而对以地震反应谱为基础的抗震计算理论,以及多层混合结构房屋、单层厂房、钢筋混凝土框架等建筑物和烟囱、水塔等构筑物的抗震设计方法,并对时程分析法、抗震计算中常用的电算分析、常见建筑物的抗震措施等作了详细介绍,最后还附有抗震计算实例和各种抗震计算方法的相应计算例题。

本书可供工民建专业大专院校师生及设计、施工人员参考及使用。

高等学校教学用书

建筑结构抗震设计

东南大学

高振世 朱继澄 唐九如 何 达 编著

清华大学

张良铎 陈 聃 主审

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

中国建筑工业出版社印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:20 字数:481千字

1997年6月第一版 1997年6月第一次印刷

印数:1—13,000册 定价:16.40元

ISBN7-112-02980-5

TU·2273 (8095)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

以原《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11—78)(以下简称原抗震规范)为依据编写的高等学校试用教材《建筑结构抗震设计》(地震出版社,1981年出版),曾为高等院校普遍使用。经重新修订的《建筑抗震设计规范》(GBJ11—89)(以下简称抗震规范),已于1991年1月颁布施行,1993年7月又对此规范进行了局部修订。故很多院校建议对《建筑结构抗震设计》教材进行重新编写,以满足教学需要。

作者也曾经是上述教材的主要编者之一,因此,我们以抗震规范和全国建筑工程学科专业指导委员会建议的工民建专业本科《建筑抗震设计》课程基本要求为依据,并结合作者多年教学科研的经验,考虑了原《建筑结构抗震设计》教材的基本体系与内容安排编写了本教材。教材内容力求密切结合我国的工程实际,注意深入浅出和理论与实际相结合。在具体安排上,首先介绍了抗震设计的基本知识、抗震设计基本要求和地基与基础的抗震设计问题;进而对以地震反应谱为基础的一般抗震计算理论以及多层混合结构房屋、单层厂房、钢筋混凝土框架结构等建筑物和烟囱、水塔等构筑物的抗震设计方法,对时程分析法等先进而成熟的抗震设计理论和设计方法进行了系统阐述;还对抗震计算中常用的电算分析方法作了介绍,对抗震规范中针对各类常见建筑物所提出的各项抗震措施也进行了必要的说明;最后还附有各类房屋的抗震计算实例和各种抗震计算方法的相应计算例题,以帮助初学者掌握各章内容。本教材可作为工民建专业本科的《建筑抗震设计》必修课的教材,亦可兼作增设的《建筑抗震设计》选修课的参考教材。

本教材由东南大学编写。具体分工如下:第一、二、四、五、七章由高振世执笔,第三章由朱继澄执笔,第六章由唐九如执笔,第八章由何达执笔;全书由高振世主编。本教材由清华大学主审,具体分工如下:第一章至第六章和第八章由张良铎主审,第七章由陈聘主审。主审对初稿所提出的诸多宝贵意见,编写者表示衷心的感谢。

本教材在编写过程中,得到东南大学土木工程系蒋永生主任的很多帮助,在此也表示衷心感谢。

由于我们水平所限,加之时间较为仓促,难免有不妥和疏忽之处,敬请各位读者批评指正。

高振世

目 录

前 言

第一章 抗震设计的基本知识	1
1-1 地震的类型和成因	1
1-2 震源、震中和地震波	3
1-3 地震震级、烈度和近震与远震	5
1-4 抗震设防	9
1-5 抗震设计的基本要求	12
参考文献	15
附录1-1 中国地震烈度表(1980)	15
附录1-2 中国地震烈度区划图(1990)、中主要城市的基本烈度和全国重点抗震城市	17
第二章 场地、地基和基础	19
2-1 建筑场地的选择	19
2-2 建筑场地类别的划分	20
2-3 天然地基的震害特点及其抗震措施	25
2-4 地基基础抗震验算	27
2-5 场地土的液化与抗液化措施	29
参考文献	37
第三章 地震作用和结构抗震验算	38
3-1 概述	38
3-2 单自由度弹性体系的地震反应分析	41
3-3 单自由度弹性体系的水平地震作用与抗震设计反应谱	48
3-4 多自由度弹性体系的地震反应分析——振型分解反应谱法	52
3-5 计算水平地震作用的底部剪力法	64
3-6 结构自振周期和振型的计算	67
3-7 建筑结构的扭转地震效应	79
3-8 地基与上部结构相互作用的影响	83
3-9 结构竖向地震作用	83
3-10 截面抗震验算	85
3-11 结构抗震变形验算	87
参考文献	90
附录3-1 用振型分解反应谱法求解多质点弹性体系的计算机程序——RST程序	91
附录3-2 求解多质点弹性体系自振周期和振型的雅可比(JACOBI)法子程序	100
第四章 多层混合结构房屋	103
4-1 多层砌体房屋的震害及其分析	103
4-2 多层砌体房屋的抗震措施	106
4-3 多层砌体房屋的抗震计算	115
4-4 多层砖房抗震验算实例	125

4-5	底层框架和多层内框架砖房的震害及其分析	133
4-6	底层框架和多层内框架砖房的抗震计算	135
4-7	底层框架和多层内框架砖房的抗震措施	140
	参考文献	143
第五章	单层厂房	144
5-1	震害及其分析	144
5-2	厂房结构的抗震措施	148
5-3	横向抗震计算	155
5-4	单层厂房考虑空间工作与扭转影响的振动分析	163
5-5	纵向抗震计算	171
5-6	构件和节点的抗震设计	182
5-7	单层厂房抗震计算实例	185
	参考文献	198
第六章	钢筋混凝土框架结构	199
6-1	震害及其分析	199
6-2	框架结构抗震设计一般要求	202
6-3	框架内力与位移计算	205
6-4	框架柱、梁、节点抗震设计	224
6-5	砖填充墙框架结构抗震设计	243
6-6	框架结构抗震设计实例	247
	参考文献	261
第七章	结构地震反应的时程分析	262
7-1	概述	262
7-2	钢筋混凝土结构构件的恢复力特性	264
7-3	地震波的选用	271
7-4	单质点体系地震反应的时程分析	273
7-5	按层间剪切模型进行地震反应的时程分析	277
7-6	按杆系模型进行地震反应的时程分析	282
	参考文献	291
	附录7-1 地震加速度记录	292
第八章	烟囱与水塔	296
8-1	烟囱	296
8-2	水塔	307
	参考文献	311

第一章 抗震设计的基本知识

地震是一种突发的自然灾害。主要由地下某处薄弱岩层突然破裂，在原有累积弹性应力作用下断层两侧发生回跳而引起振动，或者地球板块相互挤压，冲撞引起振动，并以波的形式将岩层振动传至地表引起地面的剧烈颠簸和摇晃，这种地面运动叫做地震。由于这种地震是地壳构造变动而引起的，故又称为构造地震。我国是世界上多地震国家之一。自本世纪以来的80多年内，共发生破坏性地震2600余次，其中6级以上破坏性地震500余次，平均每年5.4次，8级以上的地震9次。在六、七十年代，我国河北邢台、云南通海、四川甘孜、辽宁海城和河北唐山地区所发生的几次地震都属于能造成严重破坏的强烈地震。这些地震给人民生命财产和国民经济造成了十分严重的损失，这是必须深刻记取的教训。

鉴于1976年以来，我国的地震活动在经历了10多年相对平静的阶段之后，又进入了一个新的活跃期，近两年内5级以上地震的次数已大大高于本世纪以来年平均发震次数。预计这个新的地震活跃期可能持续到本世纪末。为了最大限度地减轻地震灾害，搞好新建工程的抗震设计，是一项重要的根本性的减灾措施。

1-1 地震的类型和成因

地震通常按其成因可划分为四种类型：构造地震、火山地震、陷落地震和诱发地震。由于地球内部岩层的构造变动引起的地震叫构造地震。构造地震分布最广，危害最大。由于火山爆发，岩浆猛烈冲出地面引起的地面震动叫做火山地震。火山地震在我国很少见。由于地表或地下的岩层如石灰岩地区较大的地下溶洞或古旧矿坑等突然发生大规模的陷落和崩塌时引起小范围内的地面震动叫陷落地震。这种地震很少造成破坏，其震级也很小。由于水库蓄水或深井注水等引起地面震动叫诱发地震。考虑到构造地震破坏性大影响面广，下面再介绍一下构造地震的发生与发展过程。有关构造地震的成因有多种学说，本章仅介绍断层说和板块构造说。

地壳是由各种岩层构成的。大量事实说明，地壳并不是静止不动的，地壳是在很长的地质年代中连续地变动着的，大片地区或在上升，或在下沉，或在倾斜。由于地球在它运动和发展过程中内部存在着大量的能量，地壳中的岩层在这些能量所产生的巨大力的作用下使原始水平状态的岩层（图1-1a）发生变形，产生地应力。当作用力只能使岩层产生形变，地应力尚较小时，岩层尚未丧失其连续完整性，而仅发生褶皱（图1-1b）。当作用力不断加强，地壳岩层中的应力不断增加，地应力的作用超过某处岩层的强度极限时，则使岩层产生断裂和错动（图1-1c）。而承受应变的岩层在其自身的弹性应力作用下发生回跳，迅速弹回到新的平衡位置。大多数情况下、断层两侧弹性回跳的方向是相反的。岩层中原来构造变动过程中积累起来的应变能，在回弹过程中得以释放，并以弹性波的形式传至地面，地面随之产生强烈振动，这就是地震。以上是按断层说解释构造地震的成因。

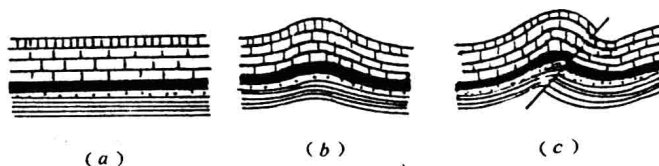


图 1-1 构造变动形成地震示意图

(a) 岩层原始状态; (b) 受力后发生变形; (c) 岩层断裂产生振动

按板块构造学说, 地球表面的最上层是由强度较大的岩石组成, 叫做岩石层, 厚度约为70~100 km; 岩石层的下面为强度较低并带有塑性的岩流层。一般认为, 地球表面的岩石层是由美洲板块、非洲板块、欧亚板块、印—澳板块、太平洋板块和南极洲等若干个大板块所组成。这些板块由于下面岩流层的对流运动而作刚体运动, 从而引起板块之间互相的挤压和冲撞等作用而产生地震。本节后面提到的地球上两个主要地震带都处于这些大板块的交界地区。因此, 板块构造学说的提出, 有助于解释上述地震带的成因。

地下岩层断裂时, 往往不是沿着一个平面发生, 而是形成一个由一系列裂缝组成的破碎地带。岩层发生断裂、错动时, 整个破碎地带的岩层不可能同时达到新的平衡状态。因此, 每次大地震的发生一般都不是孤立的, 大地震前后在发震地区, 总有很多次中小地震发生。

在一定时间内 (一般是几十天至数月) 相继发生在相近地区的一系列大小地震称为地震序列。在某一地震序列中, 最大的一次地震叫做主震。主震之前发生的地震叫做前震, 主震之后发生的地震叫做余震。在一个地震序列中, 若主震震级很突出, 其释放的能量占全序列的绝大部分叫做主震型, 这是破坏性地震中常见的一种类型。若主震震级不突出, 主要能量由多个震级相近的地震释放出来, 叫做震群型或多发型。若前震和余震都很稀少, 甚至没有, 大部能量基本上通过主震一次释放出来, 则这种地震叫做孤立型或单发型的地震。地震序列的认识和判别对预报地震和防御地震都是极其重要的。

在上述三种类型地震中, 据统计主震型地震约占60%, 震群型地震约占30%, 而单发型地震约占10%。

地震的发生与地质构造密切相关。一般说来, 岩层中原来已有断裂存在, 致使岩石的强度较低, 容易发生错动或产生新的断裂, 也就容易发生地震。特别是活动性大断裂带的两端和拐弯的部位, 两条活动断层的交汇处, 以及现代断裂差异运动变化剧烈的大型隆起或凹陷的转换地带, 地应力比较集中, 构造比较脆弱, 往往易于发生地震。

从世界范围内对地震进行历史性的研究, 可以得出历史地震的分布规律。地震主要集中在下列两个地震带: 环太平洋地震带, 从南美洲西部海岸起, 经北美西部海岸、阿拉斯加南岸、阿留申群岛, 转向西南至日本列岛, 再经我国台湾省, 而达菲律宾、新几内亚和新西兰; 这个环形地带的地震活动性最强, 全球约80~90%的地震都集中在这一地带; 地中海—喜马拉雅地震带, 西起大西洋的亚速尔, 后经意大利、土耳其、伊朗、印度北部、我国西部和西南地区, 再经缅甸、印尼的苏门答腊与爪哇, 最后与上述的环太平洋地震带相联接。

此外, 在大西洋、太平洋、印度洋中也有呈条形分布的地震带。

我国地处两大地震带的中间, 地震分布相当广泛。除台湾省和西藏南部分别属于上述

环太平洋地震带和地中海南亚地震带之外，其它地区的地震主要集中在下列两个地带：南北地震带，北起贺兰山，向南经六盘山，穿越秦岭沿川西直至云南东部，形成贯穿我国南北的条带；东西地震带，西起帕米尔高原，向东经昆仑山、秦岭，然后一支向北沿陕西、山西、河北北部向东延伸，直至辽宁北部，另一支向南向东延伸至大别山等地。

1-2 震源、震中和地震波

一、震源和震中

地震发生的地方叫震源。构造地震的震源是指地下岩层产生剧烈地相对运动的部位。这个部位不是一个点，而是有一定深度和范围的体。震源正上方的地面位置，或者说震源在地表的投影，叫震中。震中附近地面震动最厉害，也是破坏最严重的地区，叫震中区或极震区。地面某处至震中的水平距离叫做震中距。把地面上破坏程度相近的点连成的曲线叫做等震线。震源至地面的垂直距离叫做震源深度（图1-2）。

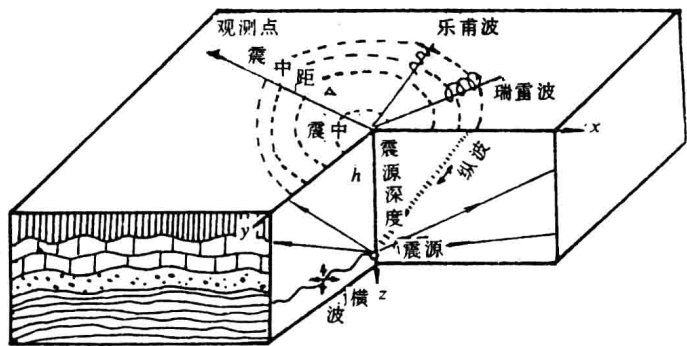


图 1-2 地震波传播示意图

通常把震源深度在60km以内的地震叫浅源地震，深度在60~300 km 范围的叫中源地震；在300 km 以上的叫深源地震。到目前为止，所观测到的最深地震是700 km。世界上绝大部分地震是浅源地震，震源深度集中在5~20 km 左右，中源地震较少，深源地震更少。一般说来，对于同样大小的地震，当震源深度较浅时，则波及的范围较小而破坏的程度较大；当震源深度较大时，波及的范围也较大，而破坏的程度相对较小。例如1960年2月29日摩洛哥艾加迪尔城5.8级地震，震源深度为3 km，震中区破坏极为严重，震中烈度竟达9度，破坏仅局限在震中附近8 km 范围内；1974年4月22日江苏溧阳发生了与上述震级相近的5.5级地震，而震源深度为18 km，震中烈度仅7度强，在离震中20 km 范围内有所破坏。比较两次地震可见，后者震中破坏比前者要轻得多，这是一个震源浅、破坏重、影响范围小的典型震例。

二、地震波

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播，这就是地震波。在地球内部传播的行波称为体波；仅限于在地球表面传播的行波称为面波。地震波是一种弹性波。

体波中包括纵波和横波两种。纵波是由震源向外传播的疏密波，质点的振动方向与波的前进方向一致，使介质不断地压缩和疏松。所以纵波又称压缩波、疏密波。如在空气中传播的声波就是一种纵波。纵波的周期较短，振幅较小。横波是由震源向外传播的剪切波，

质点的振动方向与波的前进方向相垂直，亦称剪切波。横波的周期较长，振幅较大。还应指出，横波只能在固体内传播，而纵波则在固体和液体内都能传播。

根据弹性理论，纵波速度 v_p 与剪切波速度 v_s 可分别按下列公式计算

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \tag{1-1}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{1-2}$$

式中 E ——介质的弹性模量；

ρ ——介质的密度；

μ ——介质的泊松比；

G ——介质的剪切模量。

在一般情况下，令 $\mu = 0.22$ ，从式 (1-1)和式 (1-2)可得

$$v_p = 1.67 v_s \tag{1-3}$$

由此可见，纵波的传播速度比剪切波的传播速度要快，故从震中传播出的地震波中，纵波先于剪切波到达地表。因此，通常又把纵波叫P波（即初波），把剪切波叫S波（即次波）。表1-1列出剪切波在一些土层介质中的传播速度范围（适用于深度小于10m的情况）。

从表中可见，土层土质由软至硬，在其中传播的剪切波速由小到大。剪切波速度不仅与地基的强度、变形特性等因素有密切关系，而且可采用较简便的仪器测得，故在地基土动力性质评价中占有重要地位。抗震规范正是根据剪切波速对场地土进行分类的（见第二章）。

由于地球的层状构造特点，体波通过分层介质时，将会在界面上反复发生反射和折射。当体波经过地层界面多次反射、折射后，投射到地面时，又激起两种仅沿地面传播的面波，它们是瑞雷波和乐甫波。瑞雷波传播时，质点在波的传播方向和地表面法向所组成的平面内做与波前进方向相反的椭圆运动（图1-3），而与该平面垂直的水平方向没有振动。因而瑞雷波在地面上呈滚动形式。瑞雷波具有随着距地面深度增加而振幅急剧减小的特性，这可能就是在地震时地下建筑物比地上建筑物受害较轻的一个原因。乐甫波传播时使质点在地平面内产生与波前进方向相垂直的运动，即在地面上呈现蛇形运动。乐甫波也随深度而衰减。面波的传播速度约为剪切波传播速度的90%。面波振幅大而周期长，只在地表附近传播，比体波衰减慢，故能传播到很远的地方。

剪切波的传播速度 表 1-1

土 层 类 别	v_s (m/s)
填土（包括杂填土）	90~270
粘性土（包括亚粘土等）	100~450
砂土（粉、中、粗）	150~500
砾石、卵石、碎石	200~500
风化岩	350~500
岩 石	>500

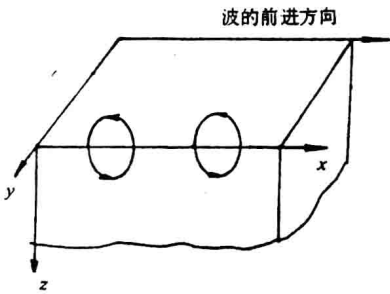


图 1-3 瑞雷波表面质点运动轨迹

综上所述，地震波的传播以纵波最快，剪切波次之，面波最慢。所以在任意一地震波记录图（图1-4）上，纵波最先到达，剪切波次之，面波到达最晚，然而就振幅而言，后者最大。从图中还可看出，在这三种波到达之间有一相对稳定区段，稳定区段的时间间隔，随着由观测点至震源之间距离的减小而缩短。在震中区，鉴于震源机制和地面扰动的复杂性，三种波的波列几乎是难以区分的。

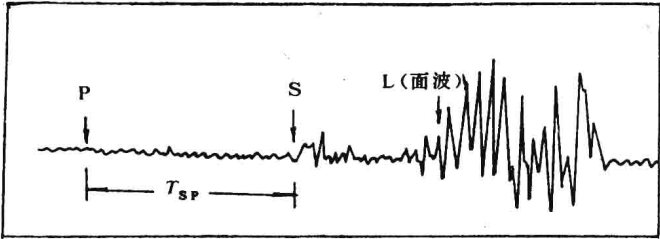


图 1-4 地震波记录图

地震现象表明，纵波使建筑物产生上下颠簸，剪切波使建筑物产生水平方向摇晃，而面波则使建筑物既产生上下颠簸又产生左右摇晃。一般是在剪切波和面波都到达时振动最为激烈。由于面波的能量比体波要大，所以造成建筑物和地表破坏，以面波为主。

1-3 地震震级、烈度和近震与远震

一、震级

震级是按着一次地震本身强弱程度而定的等级。

目前国际上比较通用的是里氏震级，其定义是1935年里希特（C.F.Richter）给出的。地震的震级是用伍德—安德生（Wood-Anderson）式标准地震仪（指摆的自振周期为0.8s，阻尼系数为0.8，放大倍数为2800倍的地震仪）所记录到的距震中100 km处最大水平地动位移（即振幅A，以μm计）的常用对数值来表示的。所以，震级M可用下式表达

M = log A (1-4)

实际上，地震时距震中恰好100 km处不一定设置地震仪，且观测点也不一定采用上述标准地震仪。因此，对于距震中距离不是100 km、且采用非标准地震仪所确定的震级，尚需进行适当修正才是所求的震级。

震级表示一次地震释放能量的多少，也是表示地震规模的指标，所以一次地震只有一个震级。各种不同的震级M与地震释放能量E（尔格）之间有如下的关系

log E = 11.8 + 1.5 M (1-5)

根据式（1-5），将各级地震所释放的能量列于表1-2。从该表可见，震级差一级，能量就要差32倍之多。一个6级地震所释放的能量，相当于一个2万吨级的原子弹。

震级及其相应的能量 表 1-2

震 级	能量 (E)	震 级	能量 (E)
1	2.00 × 10 ¹³	6	6.31 × 10 ²⁰
2	6.31 × 10 ¹⁴	7	2.00 × 10 ²²
3	2.00 × 10 ¹⁶	8	6.31 × 10 ²³
4	6.31 × 10 ¹⁷	8.5	3.55 × 10 ²⁴
5	2.00 × 10 ¹⁹	8.9	1.41 × 10 ²⁵

一般地说，小于 2 级的地震，人们感觉不到，只有仪器才能记录下来，称做微震；2~4 级地震人就感觉到了，叫有感地震；5 级以上就要引起不同程度的破坏，称为破坏性地震；7 级以上的地震则称为强烈地震。本世纪以来，由仪器记录到的最大震级是 8.9 级，共出现两次，一次是 1906 年 1 月 31 日在哥伦比亚的厄瓜多尔西海地震，另一次是 1933 年 3 月 2 日在日本的三陆近海地震。

二、地震烈度

地震烈度是地震时一定地点地面震动强弱程度的尺度。一个同样大小的地震，若震源深度、离震中的距离和土质条件等因素不同，则对地面和建筑物的破坏就有所不同。若仅用地震震级来标志地震动强度，还不足以区别地面和建筑物破坏强弱的程度。所以，在地震工程中还需用地震烈度来表示地震对地面影响的强弱程度。因此，一次地震只能有一个震级，但距离震中不同的地点，却有不同的地震烈度。一般来说，离震中越近，地震影响越大，地震烈度越高；离震中越远，地震烈度越低。表 1-3 示震源深度为 10~30 公里时，震级 M 与震中烈度 I 的大致对应关系。

震级 M 与震中烈度 I 的关系 表 1-3

震 级 M	2	3	4	5	6	7	8	8 以上
震中烈度 I	1 ~ 2	3	4 ~ 5	6 ~ 7	7 ~ 8	9 ~ 10	11	12

1. 地震烈度表

地震烈度表是评定烈度大小的标准和尺度，它是根据人的感觉、器物反应、建筑物破坏程度和自然现象等宏观现象加以判定的。

1957 年公布的《新的中国地震烈度表》（以下简称原烈度表）是中国科学院地球物理研究所根据我国地震调查的经验、建筑特点和地震历史资料，并参照国外的烈度表编制的。该表采用 12 度分度法。原烈度表在整理历史地震资料、评定地震现场的烈度分布和地震学研究中，起了很大的作用。

但是，二十多年来，我国发生了许多次破坏性地震，这些地震提供了丰富的经验，有必要加以总结；由于时代的进展，原烈度表有些地方已不能适应今天的情况，例如摆式时针已经少见，古建筑和旧式民房日益减少，而新式建筑日见增多；原烈度表中没有物理指标，缺乏客观的数量标准，使按烈度设防的工程设计缺乏统一的设计数据以便遵循。鉴于上述原因，对原烈度表进行了修订，公布了修订后的《中国地震烈度表（1980）》（以下称烈度表，见本章附录 1-1 附表 1-1）。

与原烈度表相比，烈度表具有以下特点：

（1）把人对地震的感觉发展为从低烈度至高烈度的连续尺度，即从 1 度时无感觉到 10 度时令人摔跌或被抛掷。近年来大地震的经验表明，一般 8 度时，人尚可站住，只有到 9 度、10 度时，人才会摔跤打滚。在地震烈度表中，1 度至 5 度以人的感觉为主要标志。

（2）简化了物体反应的描述，仅把它作为低烈度的标志。对于钟停摆、家俱移动、水从容器溢出、器物坠落等不常见或受许多因素影响的标志不予列入，而突出了最常见的悬物摆动的现象。

(3) 房屋不分类, 简化了房屋破坏程度的描述, 并采用平均震害指数作为房屋破坏程度的综合指标。木构架和土、石、砖墙构造的旧式房屋以及单层或多层的新式砖石房屋不再分类, 把各种构造的房屋合为一类, 看起来似不合理。实际上, 各类房屋建筑质量差异所造成的影响不亚于建筑类别差异的影响, 而采用不分类的混合统计, 应用起来更方便。平均震害指数的计算方法见本章附录1-1附表1-1之注3。

(4) 简化了各类构筑物和地表破坏现象的描述。由于牌坊、城墙等构筑物现已不多见, 没有描述它震害现象的必要。近年地震的经验表明, 地表现象受地质、地形的影响极大, 很难用作准确的烈度标志, 只可用作一定烈度的界限。

(5) 采用地面加速度峰值和速度峰值作为烈度的参考物理指标。补充物理尺度以便于工程应用并作为地区性宏观烈度标志的共同校正标准, 还可为进一步用仪器测定烈度开辟道路。

2. 基本烈度和烈度区划图

原抗震规范中规定, 一个地区的基本烈度, 是指该地区未来100年内一般场地条件下可能遭遇的最大地震烈度。中国国家地震局, 于1972年开始组织编制并于1978年颁布过原《中国地震烈度区划图(1977)》, 它曾是确定一个地区基本烈度的依据。该图的编制是, 先进行地震的危险区划, 然后完成地震烈度区划。其编制的原则如下: 根据区域地震活动、地震地质条件的特征, 对地震区进行划分, 作为进一步研究的基本单元; 分析各地震区地震活动的发展过程, 评价出各区未来百年内的地震活动趋势、最大震级和各级地震的次数; 分析地震区域内不同强度地震发生的地质构造条件, 总结出发震的构造标志; 综合地震活动性和地震地质条件的研究结果, 判定各区域内未来百年内可能发震的地点, 勾划出各级地震危险区; 依据历史地震震级与震中烈度的关系, 将危险区的震级换算为相应的震中烈度; 根据所在地震区的烈度衰减规律圈定地震影响的烈度及其分布范围。

根据上述地震烈度区划图, 全国地震烈度分布的面积数量情况如表1-4所示。由表1-4可见, 不低于7度区的面积占全国总面积的32.5%, 而不低于6度区的面积约占全国总面积的60%。该图反映了70年代我国地震烈度区划的科学水平。

全国地震烈度分布的面积数量 表 1-4

地震基本烈度分布	面积 (10 ⁴ km ²)	百分比 (%)
5度及其以下地区	384.5	40.1
6度区	263.5	27.4
7度区	206.5	21.55
8度区	71.3	7.37
9度区	23.6	2.46
10度区及其以上地区	10.7	1.12
小 计	960.0	100.0

近十年来, 我国的地震烈度区划的研究工作取得了明显的进步, 积累了大量的新资料和研究成果。现有的观测事实和研究结果均表明, 地震的发生和地震动的特性都具有一定的随机因素。因此, 地震烈度区划图的编制须采用地震危险性分析概率方法, 并对烈度赋予有限时间区限和概率水平的含意。我国新的《中国地震烈度区划图(1990)》(以下简称

新地震烈度区划图)已经国务院批准,由国家地震局和建设部于1992年5月22日正式发布施行。新地震烈度区划图上所标示的地震烈度,系指在50年期限内,一般场地条件下可能遭遇超越概率为10%的地震烈度值。该烈度称为地震基本烈度。

编制新地震烈度区划图时,考虑我国地震活动强度高、分布广、复发周期长、地震构造复杂、区域性差异大的特点,充分吸收以前地震烈度区划工作的经验和近十余年来中长期地震预测方面的成果,并采用地震危险性分析的概率方法。为了正确地反映地震活动强度、频度的空间非均匀性,首先,根据我国大区域地震活动和地质构造特点,先划分为东北、华北、华南、新疆、青藏高原、台湾和南海等7个地震区。在此基础上进一步依据构造活动性和地震活动性地区间的差异,将我国及其相邻区域再划分为27个地震带,作为统计单元。其次,又以地震带为基础,依据构造类比和地震活动的空间分布特征,确定出733个潜在震源区。然后,以地震带为基础,统计大小地震的震级——频度关系,分析未来100年的地震活动趋势,确定出该地震带的地震年平均发生率;再以强震发生的地质标志和地震活动图象为依据,进一步确定各潜在震源区的不同震级上限(即指可能发生的最大地震震级);考虑各种预测因素,按震级间隔分档的方法,将地震带内的地震年平均发生率分配于各潜在震源区。考虑到地震波衰减的地区性特点,新地震烈度区划图采用椭圆或共轭椭圆衰减模型,按各地区衰减的方向性,计算各场点的地震危险性。最后,按统一年限和概率水平的地震烈度值编制出新地震烈度区划图。全国一些主要城市的地震基本烈度列于本章的附录1-2,供参考。

三、近震与远震

震害调查表明,虽然不同地区的宏观地震烈度相同,但由于其与震中距离的远近不同,建筑物的刚度不同,则震害程度明显不同。处在大震级远震中距的柔性建筑物,其震害要比中、小震级近震中距的情况重得多。例如,1957年7月28日墨西哥地震时,远离震中407km的墨西哥城,许多的软土上的高建筑物遭到重大破坏,而低矮的旧建筑物,却很少破坏。1975年海城地震时,出现了类似的震害现象。距离震中约110km处于6度区的红阳煤矿,已建成的地面高大建筑物均受到不同程度的震害,而高度较低、刚度较大的建筑物基本上无损坏。造成上述现象,是由于地震波由震源向外传播时,短周期分量衰减得快,长周期分量衰减得慢,且长周期地震波在软土地基中又比短周期地震波放大得多,加之类共振现象的存在,而使在远离震中区的软土地基上柔性建筑物遭到较重的破坏。总之,同等烈度、不同震中距时的不同建筑,其震害是有差异的。为了反映上述宏观现象,显然将同等烈度粗略地按照震中距划分为若干区域,以示区别,这是必要的。因此,抗震规范提出了区分近震与远震的要求。

从上述全国地震烈度区划图的编制原则可看出,烈度区划图上所标明的某一地方的烈度,事实上总是相应于一定震源的,当然也包括几个不同震源所造成同等烈度的影响。为了由烈度区划图给出粗略的震中距划分,抗震规范中规定采用下列简化的方法:首先从烈度区划图上查出建设区域的基本烈度,当此基本烈度是受震中烈度与该基本烈度相等或比它大一度的地震影响时,则该区称为近震;当此基本烈度是受震中烈度比该基本烈度大二度或二度以上时,则该区称为远震(图1-5)。

按地震烈度区划图,绝大多数区域只考虑近震影响,需要考虑远震影响的城市列于本章附录1-2。

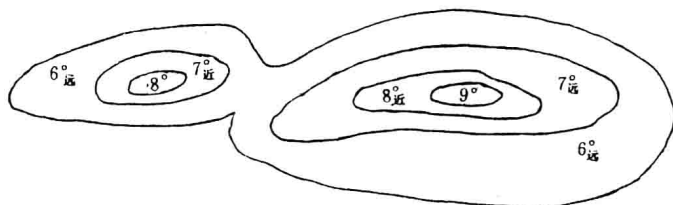


图 1-5 设计近震和远震的规范划分法

1-4 抗 震 设 防

一、抗震设防的一般目标

抗震设防是指对房屋进行抗震设计和采取抗震构造措施,以达到抗震的效果。抗震设防的依据是抗震设防烈度。

抗震设防烈度是一个地区作为抗震设防依据的地震烈度,按国家规定权限审批或颁发的文件(图件)执行;一般情况下,采用国家地震局批准的地震烈度区划图所规定的基本烈度进行设防。

原抗震规范对建筑物抗震设防的一般目标是,建筑物经抗震设防后,在遭遇相当于设计烈度的地震影响时,建筑物的损坏不致使人民生命和重要生产设备遭受危害,建筑物不需修理或经一般修理仍可继续使用。这意味着,当发生设计烈度的地震时,建筑物并不是完整无损的,而是允许有一定程度的损坏,只要不使建筑物受到严重破坏或倒塌,即认为达到抗震的目的;抗震设防通过对设计烈度地震荷载作用下的抗震强度验算加以保证。

由于地震的随机性,一幢建筑物在其使用年限内有可能遭到多次不同烈度的地震。用概率观点来衡量,遭遇最多的应该是低于所在地基本烈度的地震,但也不排除遭遇高于基本烈度地震的可能。事实上,1976年在唐山地区发生了7.8级大地震,其基本烈度竟比原预估基本烈度高出5度,造成了严重的破坏。考虑到当前一些主要国家的抗震设计规范,均采取针对多种烈度提出不同设防目标。所以,对原有设防目标作适当的完善,是完全必要的。

抗震规范对建筑物抗震设防的一般目标是,当遭受多遇的、低于本地区设防烈度的地震影响时,建筑物一般不受损坏或不需修理仍可继续使用(第一水准);当遭受本地区设防烈度的地震影响时,建筑物可能有一定损坏,经一般修理或不需修理仍可继续使用(第二水准);当遭受高于本地区设防烈度的预估罕遇地震影响时,不致倒塌或发生危及生命的严重破坏(第三水准)。

基于上述设防目标,建筑物在使用期间,对不同强度的地震应具有不同的抵抗能力。一般多遇地震(小震)发生的机率较大,因此要做到结构不损坏,这在技术上、经济上是可以做到的。而罕遇地震(大震)发生的机率较小,如果要求结构遭受罕遇地震时仍不损坏,这在经济上是不合理的,因此可以允许结构破坏,但不应导致建筑物倒塌。概括起来,抗震设防的一般目标就是要做到“小震不坏,中震可修,大震不倒”。

小震不坏、大震不倒的抗震设防目标是通过下列两阶段的抗震设计来实现的。第一阶段:通过对多遇地震烈度弹性地震作用下的结构截面强度验算,隐含着设防烈度地震作用

下的变形验算，保证小震不坏和中震可修；第二阶段：通过对罕遇地震烈度地震作用下结构薄弱部位弹塑性变形验算，并采取相应的构造措施保证大震不倒。

二、多遇地震烈度和罕遇地震烈度

如前所述，我国迄今以地震烈度区划图中的基本烈度作为抗震设防的主要依据。下面简要地介绍一下，新地震烈度区划图中的基本烈度用概率统计方法标定的情况。

在抗震规范的编制过程中，对我国华北、西南和西北地区45个城镇潜在震源、地震活动性和地震传播衰减规律进行了研究和概率统计。潜在震源的划分主要是根据地质构造条件和历史地震的震中分布。地震活动性研究表明，地区地震活动具有周期性，地震的平静期与活跃期间隔地出现。对未来统计期间内各震源可能达到的最大震级(或最大震中烈度)的估计，要根据该震源历史上发生过的最大地震；根据地震地质条件可能发生的最大地震；根据本周期能量释放的程度，考虑多种因素进行综合评定。表1-5列出若干城镇的以年超越概率表示的地震危险性分析结果^[1-1]。利用表中数据，可以算出每个城镇在任意期限内相应的超越概率，也可以算出在给定超越概率条件下的地震烈度。计算研究表明，基本烈度与50年期限内超越概率为0.13的烈度之间的偏差最小。但是，当超越概率在0.09~0.16范围内变化时与基本烈度的偏差变化不大。因此，从工程实际来考虑，可以认为基本烈度在50年期限内的平均超越概率为10%。

一年内若干城市各地震烈度的超越概率(%) 表 1-5

序号	城市	5°	5.5°	6°	6.5°	7°	7.5°	8°	8.5°	9°	9.5°	10°	10.5°	11.0°
1	北 京	7.42	4.5	2.57	1.40	0.71	0.35	0.16	0.07	0.03	0.01	0.004	0.002	0.0005
2	唐 山	7.30	4.42	2.52	1.36	0.69	0.335	0.155	0.068	0.029	0.011	0.004	0.002	0.0005
3	济 南	6.79	3.87	2.03	0.972	0.422	0.166	0.059	0.019	0.0057	0.0016	0.00044	0.00013	0.00004
4	青 岛	3.42	1.82	0.889	0.401	0.167	0.065	0.0236	0.008	0.0028	0.00092	0.00031	0.0001	0.000036
5	临 沂	4.05	2.28	1.21	0.611	0.298	0.142	0.066	0.03	0.013	0.00536	0.00213	0.0008	0.00028
6	兰 州	5.22	3.07	1.70	0.889	0.444	0.213	0.0993	0.0451	0.0201	0.0087	0.0037	0.0015	0.00062
7	昆 明	18.1	11.4	6.80	3.89	2.15	1.14	0.582	0.283	0.131	0.058	0.0244	0.0098	0.00375

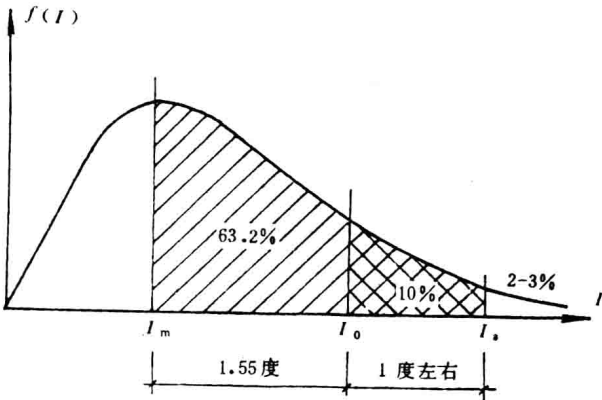


图 1-6 三种烈度的超越概率示意图

I_m —多遇地震烈度， I_0 —基本烈度， I_s —罕遇地震烈度

如前所述，在50年期限内基本烈度的超越概率为13%。这样的超越概率虽然不能说很大，但与之相应的烈度决不是实际上不可能发生的小概率事件，所以某地区的基本烈度并不能认为是该地区的罕遇地震烈度。为了确定多遇地震烈度和罕遇地震烈度的数值，要找出合理的烈度概率密度函数分布曲线。研究表明，可取极值Ⅲ型曲线作为烈度概率密度 f 的分布曲线(图1-6)，当取烈度 I 的下限为5度其上限为12度，对于不同烈度按曲线所算出的超越概率值(即计算烈度竖线右侧由曲线与横坐标所包围的面积)

与相应按地震危险性分析所得到50年期限内的超越概率值十分接近，故可根据图1-6示曲线来确定多遇地震烈度和罕见地震烈度。

极值Ⅲ型分布函数的表达式为

$$F(I) = \exp\left[-\left(\frac{\omega - I}{\omega - I_m}\right)^K\right] \quad (1-6)$$

式中 ω ——上限值，如上所述，此处的相应地震烈度应为 $\omega = 12.0^\circ$ ；

I_m ——众值烈度，当令计算烈度 $I = I_m$ ，代入式(1-6)得相应众值烈度的分布函数数值为 e^{-1} ，相应的众值烈度的超越概率为 $1 - e^{-1} = 0.632$ ；

K ——形状参数，属于待定的参数，对于北京地区得 $K = 6.834428$ 。

所谓多遇地震烈度就是发生机会比较多的地震，故多遇地震烈度应是烈度概率密度函数曲线峰点所对应的烈度。上面计算表明，50年期限内多遇地震烈度的超越概率为63.2%，即50年内发生超过多遇地震烈度的地震大约有63.2%，多遇地震烈度大约比基本烈度低1.55度（图1-6）。通过对45个城镇的地震危险性分析，结合我国的经济状况，将罕遇地震烈度定为比基本烈度高出1度左右，其50年期限内相应的超越概率大约为2~3%。抗震规范中罕遇地震烈度取值为：当基本烈度为6度时为7度强，7度时为8度强，8度时为9度弱，9度时为9度强。

三、抗震设防的范围

原抗震规范的抗震设防范围为地震烈度7度、8度和9度，建筑抗震设计规范（GBJ 11—89）的抗震设防范围扩大为6度、7度、8度和9度，烈度为10度的地区，其建筑抗震设计应按有关专门规定执行。

建筑抗震设计规范（GBJ 11—89）定为6度地区要进行抗震设防系考虑到：建国以来历次地震震害表明，6度地区就已有破坏，在某些情况下可能有较重的破坏。特别是5级左右的地震发生的次数很多，而其影响程度较多的是6度、7度。基于上述情况，为了防止发生6度地震时，造成国民经济较大的损失和人员伤亡，将设防范围扩大到6度地区是必要的。但考虑到我国6度地区范围较大，为适应目前国内的经济水准，在多数情况下对6度地区的建筑（建造于Ⅳ类场地上的较高建筑除外，关于建筑场地类别划分方法见第二章）以加强构造措施为主，不必进行抗震验算。

四、建筑物的类别及其设防标准

抗震设防标准是通过地震作用计算和抗震构造措施来实现的。建筑物的重要程度不同，它们的设防标准也就不同。

1. 建筑物的类别

原抗震规范仅将建筑物分为特别重要的、一般的和次要的建筑物，没有对建筑物的分类作出明确规定。建筑抗震设计规范（GBJ 11—89）将建筑物按其重要性分为甲、乙、丙和丁类：

特别重要的建筑物属于甲类建筑。当遭遇地震破坏时，将产生放射性物质的污染，剧毒气体的扩散，大爆炸等严重后果的建筑物，以及在遭遇地震破坏后，对政治、经济、社会产生不可挽回的重大影响的建筑物。甲类建筑应按国家规定的批准权限报请批准执行。

重要的建筑物属于乙类建筑。指国家重点抗震城市的生命线工程建筑，它包括医疗、广播、通讯、交通、供水、供电、供气、消防、粮食等。全国重点城市共52个，列于本章