



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材

高校土木工程

专业指导委员会规划推荐教材

建筑结构抗震设计

(第二版)

李国强 李 杰 苏小卒 编著



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

TU352.1/34=2

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

建筑结构抗震设计

(第二版)

李国强 李 杰 苏小卒 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗震设计/李国强等编著. —2版. —北京: 中国工业出版社, 2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材. 高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-09695-4

I. 建… II. 李… III. 建筑结构-抗震设计-高等学校-教材
IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 181819 号

**普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
建筑结构抗震设计**

(第二版)

李国强 李 杰 苏小卒 编著

*

中国工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 19 字数: 459 千字

2008 年 2 月第二版 2008 年 2 月第十四次印刷

印数: 68001—73000 册 定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-09695-4

(16359)

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)

本教材自 2002 年第一版以来,被许多高校采用,五年来已重印十余次。2006 年以来,先后被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和普通高等教育土建学科专业“十一五”规划教材。结合国家和建设部规划教材的建设,作者对本教材第一版进行了较全面的修订。

本书主要包括:绪论、场地与地基、结构地震反应分析与抗震计算、多层砌体结构抗震设计、多高层建筑钢筋混凝土结构抗震设计、多高层建筑钢结构抗震设计、单层厂房抗震设计、隔震减震与结构控制初步等。

本书可作为高校土木工程专业教材,也可供从事各类工程结构设计和施工的工程技术人员参考使用。

* * *

责任编辑:朱首明 吉万旺

责任设计:赵明霞

责任校对:王雪竹

第二版前言

本教材自2002年8月出第一版第一次印刷,被许多高校采用,五年来已重印十余次。2006年教育部开始建设“十一五”国家规划教材,本教材被列为其中的建设项目,2007年本教材被建设部确定为“十一五”部级规划教材。结合国家和建设部规划教材的建设,作者决定对本教材进行一次较全面的修订。本次修订的主要内容包括:

1) 对各章内容进行了全面梳理,进一步协调了与我国现行建筑抗震设计规范相关的内容;

2) 更正了前一版教材中的文字错误及用语不妥之处;

3) 新增了“多高层钢结构的抗震概念设计”一节内容;

4) 补充了多高层钢结构抗震构造要求的背景;

5) 补充了一种新型耗能支撑—屈曲约束支撑的介绍。

教材要靠教师在教学实践过程中不断完善,我们衷心地希望并感谢使用本教材的教师向我们提出宝贵的意见,我们定当认真研究,为本教材的改进不懈努力。

作者

2007年9月

第一版前言

新版《建筑抗震设计规范》(GBJ 50011—2001)从2002年1月1日起开始实施。此次抗震规范的修订,调查总结了近年来国内外大地震的经验教训,考虑了我国当前的经济条件和已有的工程实践,采纳了地震工程的新科研成果。重要的修订内容有:调整了建筑的抗震设防分类;提出了按设计基本地震加速度进行抗震设计的要求;将原规范的设计近震、远震改为设计特征周期分区;增补了不规则建筑结构的概念设计和楼层地震剪力控制的要求;增加了有关发震断裂、桩基、混凝土筒体结构、钢结构房屋和房屋隔震与减震的内容。为配合新规范的颁布执行和适应建筑抗震设计思想与方法的不断发展,我们结合多年在地震工程与工程抗震方面的教学与科研实践,按新规范编写了本教材。

本教材共分八章,分别介绍了地震有关知识、抗震设计原则与要求、场地分类与基础抗震、地震作用与结构地震反应分析、砌体结构、多高层钢筋混凝土结构、多高层钢结构和单层厂房结构抗震设计以及隔震与减震设计。为便于学生理解与学习,各章均配有例题及习题与思考题。本书第1、2、4、8章由李杰执笔,第5、7章由苏小卒执笔,第3、6章由李国强执笔;全书由李国强负责统稿,由北京工业大学曹万林教授主审。

本教材早在1997年就被上海市教育委员会列为上海市普通高校“九五”重点教材建设计划,我们对上海市教委给予的支持与资助表示衷心的感谢。另外,研究生赵欣、李明菲、丁军帮助整理了本书的部分手稿,我们对他们为本书所花费的精力表示谢意。由于我们水平有限,书中不当或错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

2002年5月

目 录

第1章 绪论	1
§ 1.1 地震与地震动	1
§ 1.2 地震震级与地震烈度	4
§ 1.3 地震灾害概说	6
§ 1.4 工程抗震设防	8
§ 1.5 抗震设计的总体要求	11
习题	14
第2章 场地与地基	15
§ 2.1 场地划分与场地区划	15
§ 2.2 地基抗震验算	18
§ 2.3 地基土液化及其防治	20
习题	25
第3章 结构地震反应分析与抗震计算	27
§ 3.1 概述	27
§ 3.2 单自由度体系的弹性地震反应分析	29
§ 3.3 单自由度体系的水平地震作用与反应谱	35
§ 3.4 多自由度弹性体系的地震反应分析	41
§ 3.5 多自由度弹性体系的最大地震反应与水平地震作用	49
§ 3.6 竖向地震作用	63
§ 3.7 结构平扭耦合地震反应与双向水平地震影响	64
§ 3.8 结构非线性地震反应分析	71
§ 3.9 结构抗震验算	84
习题	91
第4章 多层砌体结构抗震设计	94
§ 4.1 多层砌体结构的震害特点	94
§ 4.2 多层砌体结构选型与布置	96
§ 4.3 多层砌体结构的抗震计算	98
§ 4.4 多层砌体结构抗震构造措施	108
§ 4.5 底部框架-抗震墙砌体房屋抗震设计	112
习题	116

第5章 多高层建筑钢筋混凝土结构抗震设计	118
§ 5.1 多高层钢筋混凝土结构的震害及其分析	118
§ 5.2 选型、结构布置和设计原则	123
§ 5.3 钢筋混凝土框架结构的抗震设计	129
§ 5.4 抗震墙结构的抗震设计	144
§ 5.5 框架-抗震墙结构的抗震设计	153
§ 5.6 高强混凝土结构的抗震设计要求	162
§ 5.7 例题	163
习题	175
附表	176
第6章 多高层建筑钢结构抗震设计	181
§ 6.1 多高层钢结构的主要震害特征	181
§ 6.2 多高层钢结构的选型与结构布置	185
§ 6.3 多高层钢结构的抗震概念设计	189
§ 6.4 多高层钢结构的抗震计算要求	196
§ 6.5 多高层钢结构抗震构造要求	198
习题	207
第7章 单层厂房抗震设计	208
§ 7.1 震害分析	208
§ 7.2 抗震设计	210
§ 7.3 抗震构造措施和连接的计算要求	242
§ 7.4 计算实例	249
习题	269
第8章 隔震、减震与结构控制初步	272
§ 8.1 结构抗震设计思想的演化与发展	272
§ 8.2 隔震原理与方法	273
§ 8.3 减震原理与方法	277
§ 8.4 结构主动控制初步	284
习题	286
附录 A 中国地震烈度表(1980)	287
附录 B 我国主要城市和地区的抗震设防烈度与地震分组	289
参考文献	291

第1章 绪 论

§ 1.1 地震与地震动

地震是一种自然现象。据统计,地球每年平均发生 500 万次左右的地震,其中,5 级以上的强烈地震约 1000 次左右。如果强烈地震发生在人类聚居区,就可能造成地震灾害。为了抵御与减轻地震灾害,有必要进行工程结构的抗震分析与抗震设计。

1.1.1 地震类型与成因

地震可以划分为诱发地震和天然地震两大类。

诱发地震主要是由于人工爆破、矿山开采及重大工程活动(如兴建水库)所引发的地震,诱发地震一般不太强烈,仅有个别情况(如水库地震)会造成严重的地震灾害。

天然地震包括构造地震与火山地震。前者由地壳构造运动所产生,后者则由火山爆发所引起。比较而言,构造地震发生数量大(占地震发生总数约 90%)、影响范围广,是地震工程的主要研究对象。

对于构造地震,可以从宏观背景和局部机制两个层次上解释其成因。从宏观背景上考察,地球内部由三个圈层构成:地壳、地幔与地核。通常认为:地球最外层是由一些巨大的板块所组成(图 1-1),板块向下延伸的深度大约为 70~100km。由于地幔物质的对流,这些板块一直在缓慢地相互运动。板块的构造运动,是构造地震产生的根本原因。从局部机制上分析,地球板块在运动过程中,板块之间的相互作用力会使地壳中的岩层发生变形(图 1-2b)。当这种变形积聚到超过岩石所能承受的程度时,该处岩体就会发生突然断裂或错动(图 1-2c),从而引起地震。

地球内部断层错动并引起周围介质振动的部位称为震源。震源正上方的地面位置叫震中。地面某处至震中的水平距离叫做震中距。

1.1.2 地 震 波

地震时,地下岩体断裂、错动并产生振动。振动以波的形式从震源向外传播,就形成了地震波,其中,在地球内部传播的波称为体波,而沿地球表面传播

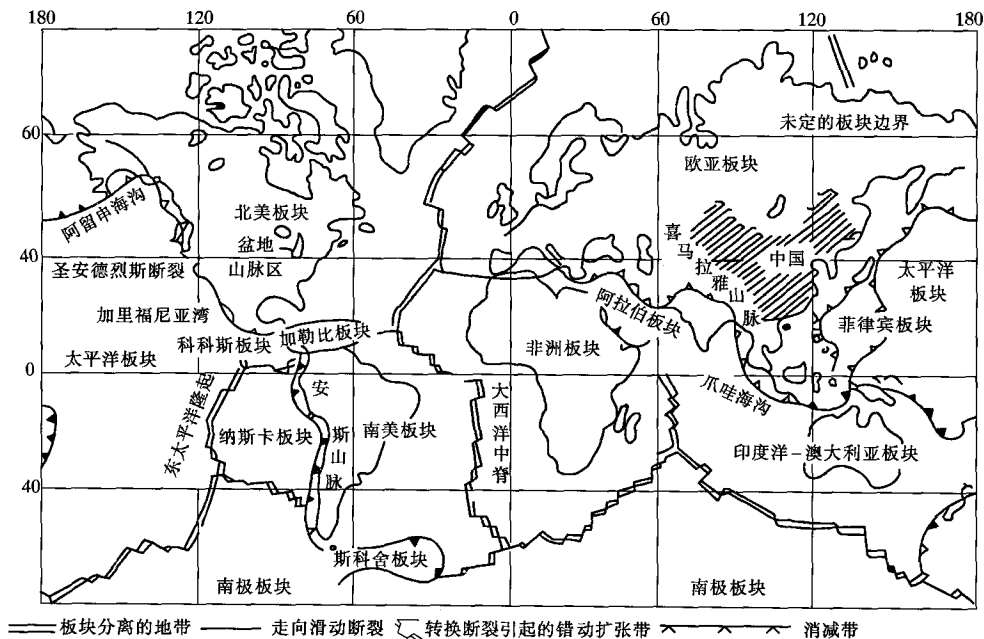


图 1-1 板块分布图

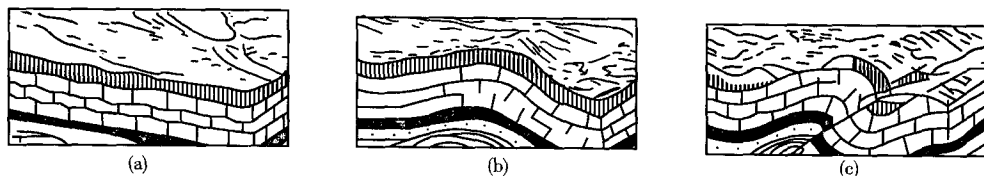


图 1-2 岩层的变形与破裂

(a)岩层的原始状态；(b)受力发生弯曲；(c)岩层破裂发生振动

的波叫做面波。

体波有纵波和横波两种形式。纵波是由震源向外传递的压缩波，其介质质点的运动方向与波的前进方向一致(图 1-3a)。纵波一般周期较短、振幅较小，在地面引起上下颠簸运动。横波是由震源向外传递的剪切波，其质点的运动方向与波

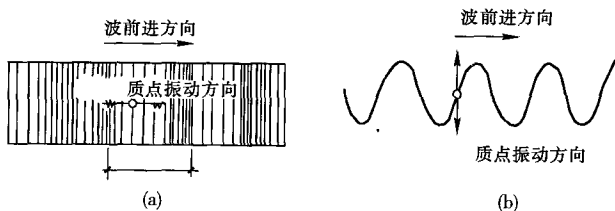


图 1-3 体波质点振动形式

(a)压缩波；(b)剪切波

的前进方向相垂直(图 1-3b)。横波一般周期较长, 振幅较大, 引起地面水平方向的运动。

面波主要有瑞雷波和乐夫波两种形式。瑞雷波传播时, 质点在波的前进方向与地表法向组成的平面内作逆时的椭圆运动(图 1-4a)。这种运动形式被认为是形成地面晃动的主要原因。乐夫波传播时, 质点在与波的前进方向相垂直的水平方向运动(图 1-4b), 在地面上表现为蛇形运动。面波周期长, 振幅大。由于面波比体波衰减慢, 故能传播到很远的地方。

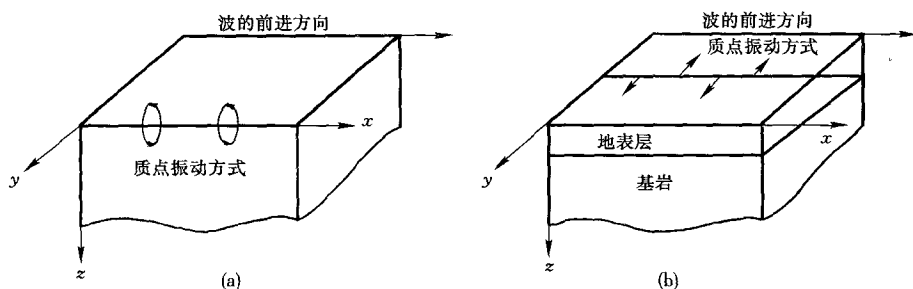


图 1-4 面波质点振动方式
(a)瑞雷波质点振动; (b)乐夫波质点振动

地震波的传播速度, 以纵波最快、横波次之、面波最慢。所以, 在地震发生的中心地区人们的感受是, 先上下颠簸, 后左右摇晃。当横波或面波到达时, 地面振动最为猛烈, 产生的破坏作用也较大。在离震中较远的地方, 由于地震波在传播过程中能量逐渐衰减, 地面振动减弱, 破坏作用也逐渐减轻。

1.1.3 地震动

由地震波传播所引发的地面振动, 通常称为地震动。其中, 在震中区附近的地震动称为近场地震动。对于近场地震动, 人们一般通过记录地面运动的加速度来了解地震动的特征。对加速度记录进行积分, 可以得到地面运动的速度与位移(图 1-5)。一般说来, 地震动在空间上具有 3 个平动方向的分量, 3 个转动方向的分量。

从前面对于地震波的介绍可知, 地面上任一点的振动过程实际上包括了各种类型地震波的综合作用。因此, 地震动记录的最明显表征是其不规则性。从工程应用角度考察, 可以采用有限的几个要素反映不规则的地震波。例如, 通过最大振幅, 可以定量反映地震动的强度特性; 通过对地震动记录的频谱分析, 可以揭示地震动的周期分布特征; 通过对强震持续时间的定义和测量, 可以考察地震动循环作用程度的强弱。地震动的峰值(最大振幅)、频谱和持续时间, 通常称为地震动的三要素。工程结构的地震破坏与地震动三要素密切相关。

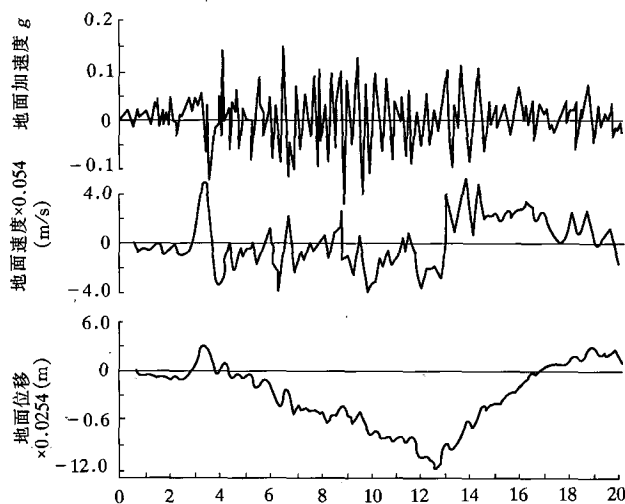


图 1-5 地面运动的加速度、速度、位移

§ 1.2 地震震级与地震烈度

1.2.1 地震震级

地震震级是表示地震大小的一种度量。其数值是根据地震仪记录到的地震波图确定的。根据我国现用仪器，近震(震中距小于 1000km)震级 M 按下式计算：

$$M = \log A + R(\Delta) \quad (1-1)$$

式中 A ——记录图上量得的以“ μm ”为单位的最大水平位移；

$R(\Delta)$ ——依震中距 Δ 而变化的起算函数。

震级 M 与震源释放能量 E (单位为尔格)之间的关系为：

$$\log E = 1.5M + 11.8 \quad (1-2)$$

上式表示的震级通常又称为里氏震级。

式(1-2)表明，震级每增加一级，地震所释放出的能量约增加 30 倍。大于 2.5 级的浅震，在震中附近地区的人就有感觉，叫做有感地震；5 级以上的地震，会造成明显的破坏，叫做破坏性地震。世界上已记录到的最大地震的震级为 8.9 级。

1.2.2 地震烈度

地震烈度是指某一区域内的地表和各类建筑物遭受一次地震影响的平均强弱程度。一次地震，表示地震大小的震级只有一个。然而，由于同一次地震对不同地点的影响不一样，随着距离震中的远近变化，会出现多种不同的地震烈度。一

般来说,距离震中近,地震烈度就高;距离震中越远,地震烈度也越低。为评定地震烈度而建立起来的标准叫做地震烈度。不同国家所规定的地震烈度表往往是不同的,我国规定的地震烈度表见本书附录 A。

对应于一次地震,在受到影响的区域内,可以按照地震烈度表中的标准对一些有代表性的地点评定出地震烈度。具有相同烈度的各个地点的外包络线,称为等烈度线(图 1-6)。等烈度线(或称等震线)的形状与发震断裂取向、地形、土质等条件有关,多数近似呈椭圆形。一般情况下,等烈度线的度数随震中距的增大而递减,但有时由于局部地形或地质的影响,也会在某一烈度区内出现小块高一度或低一度的异常区(称为烈度异常)。利用历史地震的等烈度线资料,可以针对不同地区建立宏观的地震烈度衰减规律关系式。

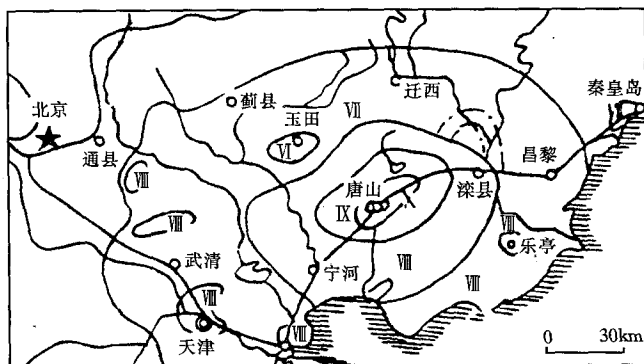


图 1-6 唐山地震等烈度线

震中区的地震烈度称为震中烈度。依据震级粗略地估算震中烈度的方法是:震级减 1 后乘 1.5, 即为震中烈度。即

$$M = 1 + \frac{2}{3} I \quad (1-3)$$

式中 I ——震中烈度。

1.2.3 基本烈度与地震区划

基本烈度是指一个地区在一定时期(我国取 50 年)内在一般场地条件下按一定概率(我国取 10%)可能遭遇到的最大地震烈度。它是一个地区进行抗震设防的依据。

依据地质构造资料、历史地震规律、强震观测资料,采用地震危险性分析的方法,可以计算给出每一地区在未来一定时限内关于某一烈度(或地震动加速度值)的超越概率,从而,可以将国土划分为不同基本烈度所覆盖的区域。这一工作称为地震区划。随着研究工作的深入,地震区划已经可以给出地震动参数(如地震动的幅值)区划结果。

§ 1.3 地震灾害概说

1.3.1 中国地震背景

对世界范围内的强烈地震的统计分析表明,全球地震主要集中在两个大的地震构造系范围内。其一是环太平洋地震构造系,集中了全世界地震总数的75%;其二是位于北纬 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间的大陆地震构造系,集中了全球大陆地震的90%。图1-7是全球重大地震的一个统计结果。

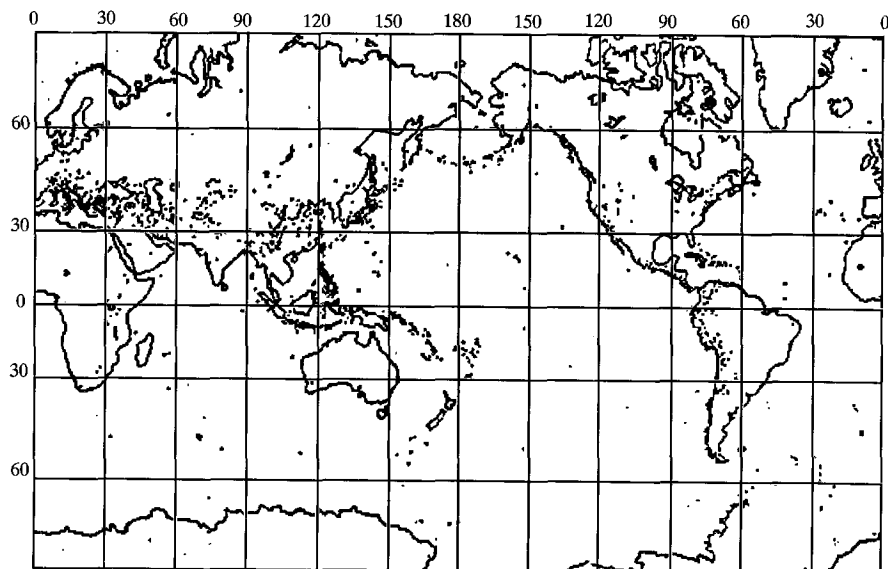


图 1-7 公元前 2000 年~公元 1979 年重大地震分布

我国位于世界两大地震构造系的交汇区域,历史上就是地震多发的国家之一。据统计,公元前 1177 年~1976 年,我国共发生 4.7 级以上强震三千一百余次。1900 年~1980 年间,我国发生 6 级以上强震 606 次,8 级以上地震 8 次,地震中共死亡约 146.8 万人,约占全球地震死亡人数的一半。惨重的地震灾害,给人类带来了不幸,也为后人抵御地震、考察地震灾害提供了大量的资料。

1.3.2 地震的破坏作用

对历史地震的考察与分析表明,地震的破坏作用主要表现为三种形式:地表破坏、建筑物的破坏、次生灾害。

1. 地表破坏及其影响

地表破坏主要表现为地裂缝、地面下沉、喷水冒砂和滑坡等形式。

地裂缝分为构造性地裂缝和重力式地裂缝两类。前者是地震断层错动后在地表形成的痕迹。裂缝带长可延伸几千米到几千米，带宽达数十厘米到数米。后者是由于地表土质不匀及受地貌影响所形成，其规模较前者为小。当地裂缝穿过建筑物时，会造成结构开裂直至建筑物倒塌。

地面下沉多发生在软土分布地区和矿业采空区。地面的不均匀沉降易引起建筑物的破坏甚至倒塌。

在地面下水位较高的地区，地震波的作用会使地下水压急剧增高，从而导致地下水经地裂缝或其他通道喷出地面。当地表土层含有砂层或粉土层时，会造成砂土液化甚至出现喷水冒砂现象，液化可以造成建筑物倾斜与倒塌、埋地管网的大面积破坏。

在河岸、山崖、丘陵地区，地震时极易诱发滑坡。地震时的大滑坡可以切断交通通道、冲毁房屋和桥梁、堵塞河流。

2. 建筑物的破坏

建筑物的破坏可以因前述地表破坏引起，在性质上属于静力破坏。更常见的建筑物破坏是由于地震地面运动的动力作用所引起，在性质上属于动力破坏。我国历史地震资料表明，90%左右的建筑物的破坏是地表运动所导致的动力破坏作用所引起的。因此，结构物动力破坏机制的分析，是结构抗震研究的重点和结构抗震设计的基础。

建筑物的动力破坏主要表现为主体结构强度不足所形成的破坏和结构丧失整体性两类破坏形式。其中，强度破坏主要是因为结构承重构件的抗剪、抗弯、抗压等强度不足而形成。例如，墙体裂缝、钢筋混凝土构件开裂或酥裂等。结构构件发生强度破坏前后，结构物一般进入弹塑性变形阶段。在这一阶段，结构物在强烈振动作用下会因为延性不足、节点连接失效、主要承重构件失稳等原因而丧失整体性，从而造成局部或整体结构的倒塌。

表 1-1 与表 1-2 分别是我国历史强震中多层砖房和单层混凝土柱工业厂房的部分震害资料统计结果。对这些资料的研究与分析，有助于从宏观上认识建筑结构在不同烈度下的总体破坏特征。

多层砖房屋震害程度统计(2054 幢)

表 1-1

震害程度	地震烈度调查情况		6 度		7 度		8 度		9 度		10 度	
	栋数	百分比	栋数	百分比	栋数	百分比	栋数	百分比	栋数	百分比	栋数	百分比
基本完好	230	45.9	250	40.8	22	14.8	7	1.6	2	0.6		
轻微损坏	212	42.3	231	37.7	24	16.1	35	7.8	19	5.6		
中等破坏	56	11.2	75	12.2	54	36.2	138	30.7	23	6.7		
严重破坏	3	0.6	54	8.8	40	27.5	169	37.5	68	19.9		
倒塌	—	—	3	0.5	8	5.4	101	23.4	229	67.2		
总计	501	100	613	100	149	100	450	100	341	100		

单层混凝土柱工业厂房震害统计(249 栋)

表 1-2

震害程度	地震烈度调查情况	7 度		8 度		9 度		10 度	
		栋数	百分比	栋数	百分比	栋数	百分比	栋数	百分比
基本完好		3	15.8	24	13.7	—	—	—	—
轻微损坏		11	57.9	46	26.3	1	10	3	6.7
中等破坏		3	15.8	59	33.7	2	20	15	33.3
严重破坏		2	10.5	38	21.7	7	70	11	24.4
倒塌		—	—	8	4.6	—	—	16	35.6
总计		19	100	175	100	10	100	45	100

3. 次生灾害

地震时, 水坝、燃气管道、供电线路的破坏, 以及易燃、易爆、有毒物质容器的破坏, 均可造成水灾、火灾、空气污染等次生灾害。例如, 1995 年的日本阪神大地震, 震后火灾多达 500 余处, 震中区木结构房屋几乎全部烧毁。此外, 地震引起的海啸, 也会对海边建筑物造成巨大的破坏。

§ 1.4 工程抗震设防

1.4.1 抗震设防的目的和要求

工程抗震设防的基本目的是在一定的经济条件下, 最大限度地限制和减轻建筑物的地震破坏, 保障人民生命财产的安全。为了实现这一目的, 近年来, 许多国家的抗震设计规范都趋向于以“小震不坏、中震可修、大震不倒”作为建筑抗震设计的基本准则。

我国对小震、中震、大震规定了具体的超越概率水准。根据对我国几个主要地震区的地震危险性分析结果, 认为我国地震烈度 I 的概率分布基本上符合于极值 III 型分布, 其概率密度函数的基本形式为:

$$f(I) = \frac{k(\omega - I)^{k-1}}{(\omega - \epsilon)^k} \cdot e^{-\left(\frac{\omega - I}{\omega - \epsilon}\right)^k} \quad (1-4)$$

式中 k ——形状参数, 取决于一个地区的地震背景的复杂性;

ω ——地震烈度上限值, 取 $\omega = 12$;

ϵ ——烈度概率密度曲线上峰值所对应的强度。

地震烈度概率密度函数曲线的基本形状如图 1-8 所示, 其具体形状参数取决于设定的分析年限和具体地点。

从概率意义上说, 小震就是发生机会较多的地震。根据分析, 当分析年限取为 50 年时, 上述概率密度曲线的峰值烈度所对应的被超越概率为 63.2%, 因此, 可以将这一峰值烈度定义为小震烈度, 又称多遇地震烈度。而全国地震区划

图所规定的各地的基本烈度,可取为中震对应的烈度。它在 50 年内的超越概率一般为 10%。大震是罕遇的地震,它所对应的地震烈度在 50 年内超越概率 2% 左右,这个烈度又可称为罕遇地震烈度。通过对我国 45 个城镇的地震危险性分析结果的统计分析得到:基本烈度较多遇烈度约高 1.55 度,而较罕遇烈度约低 1 度(图 1-8)。

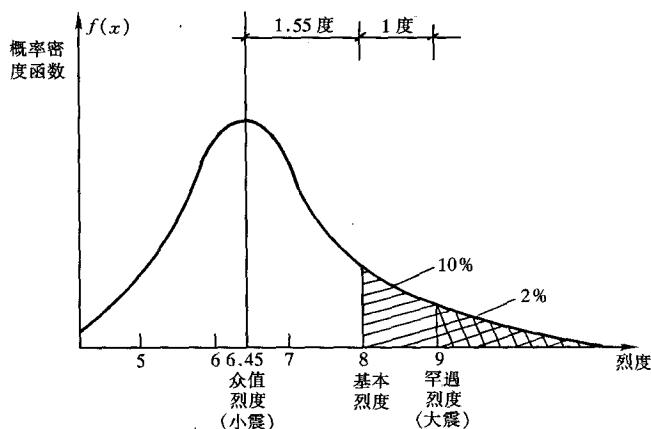


图 1-8 三种烈度含义及其关系

对应于前述设计准则,我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)明确提出了三个水准的抗震设防要求:

第一水准:当遭受低于本地区设防烈度的多遇地震影响时,建筑物一般不受损坏或不需修理仍可继续使用;

第二水准:当遭受相当于本地区设防烈度的地震影响时,建筑物可能损坏,但经一般修理即可恢复正常使用;

第三水准:当遭受高于本地区设防烈度的罕遇地震影响时,建筑物不致倒塌或发生危及生命安全的严重破坏。

在一般情况下,上述设防烈度采用基本烈度,但对进行过抗震设防区划工作并经主管部门批准的城市,按批准的抗震设防区划确立设防烈度或设计地震动参数。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)对我国主要城镇中心地区的抗震设防烈度、设计地震加速度值给出了具体规定(附录 B)。在这些规定中,还同时指出了所在城镇的设计地震分组,这主要是为了反映潜在震源远近的影响。一般而言,潜在震源远,地震时传来的地震波长周期分量较显著。为反映这一影响,对各城镇在规定抗震设防烈度、抗震设计地震动加速度值的同时,还给出了设计地震分组。这一划分使对地震作用的计算更为细致。

我国采取 6 度起设防的方针。根据这一方针,我国地震设防区面积约占国土面积的 60%。