



河南省“十四五”普通高等教育规划教材

# 建筑结构抗震设计

JIANZHU JIEGOU KANGZHEN SHEJI

主 编 张新中 王廷彦  
副主编 张军伟 韩爱红



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

# 前 言

## Preface

2022年10月16日,党的二十大将“坚持以人民安全为宗旨,提高防灾减灾救灾处置保障能力”写进报告中。提高建筑结构抗震能力、减轻建筑结构损伤破坏、提高人民生命财产安全不仅是我国防灾减灾工程的重要工作,也是本教材的编写宗旨。

本教材以培养高级技术应用型人才为目的,适用于高等院校土建类专业学生以及从事工程结构设计与施工的技术人员。教材的编写结合了土建类专业人才培养方案和教学大纲的要求,并注重知识的基础性、实用性、科学性和先进性,还设置了丰富的案例,有助于提高建筑结构从业人员的知识、能力和素质。

本教材依据国家近年来陆续实施的《建设工程抗震管理条例》《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB 55002—2021)、《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB 50068—2018)、《混凝土结构通用规范》(GB 55008—2021)及《建筑隔震设计标准》(GB/T 51408—2021)等新规范或新标准进行编写,增加视频、动画等电子资源,便于学生对相关知识进行拓展学习。

本教材由华北水利水电大学张新中教授级高级工程师制定大纲和统稿。全书共10章,第1章、第2章和第3章由河南农业大学张军伟高级工程师撰写,第4章和第5章华北水利水电大学韩爱红副教授撰写,第6章由华北水利水电大学王廷彦博士撰写,第7章由河南工业大学熊晓莉副教授撰写,第8章由广州大学吴从晓副教授撰写,第9章由华北水利水电大学王廷彦博士撰写,第10章由华北水利水电大学汪志昊教授撰写。

本教材推荐课时如下:

章	第1章	第2章	第3章	第4章	第5章	第6章	第7章	第8章	第9章	第10章
推荐	6课时	2课时	4课时	6课时	6课时	8课时	4课时	4课时	6课时	2课时
合计	48课时									

编写本教材时,广州大学博士研究生李家乐对本书部分素材进行了收集与整理,本书编者也参考和引用了一些公开发表的文献与资料,谨向这些人员和作者表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者



## 目 录

## Contents

<b>第 1 章</b>	<b>地震基础知识与抗震设防</b>	<b>1</b>
1.1	地震的类型和成因	1
1.2	地震波及地震动参数	3
1.3	地震度量	6
1.4	地震震害	13
1.5	工程结构的抗震设防	18
	习题	20
<b>第 2 章</b>	<b>抗震概念设计和性能化设计</b>	<b>21</b>
2.1	抗震概念设计和性能化设计概述	21
2.2	抗震概念设计	22
2.3	抗震性能化设计	32
	习题	37
<b>第 3 章</b>	<b>场地、地基和基础抗震设计</b>	<b>38</b>
3.1	场地	38
3.2	液化土、软土、天然和复合地基的抗震	42
3.3	基础和桩基的抗震验算	49
	习题	51
<b>第 4 章</b>	<b>地震作用和结构抗震验算</b>	<b>52</b>
4.1	地震作用和结构抗震验算概述	52
4.2	单自由度体系的水平地震反应	53
4.3	单自由度体系的水平地震作用	59
4.4	多自由度体系的地震反应分析	63
4.5	多自由度体系的最大地震反应与水平地震作用	70
4.6	结构竖向地震作用计算	79
4.7	结构基本周期的近似计算方法	80
4.8	考虑扭转耦联、地基和结构相互作用的计算	86
4.9	地震作用的一般规定和结构抗震验算	92



习题 .....	96
<b>第 5 章 砌体结构抗震设计 .....</b>	<b>98</b>
5.1 砌体结构震害及其分析 .....	98
5.2 抗震设计的一般规定 .....	99
5.3 砌体房屋的抗震设计 .....	102
5.4 底部框架-抗震墙砌体房屋的抗震设计 .....	119
习题 .....	125
<b>第 6 章 多层及高层混凝土结构抗震设计 .....</b>	<b>126</b>
6.1 钢筋混凝土结构震害现象及其分析 .....	126
6.2 多层及高层混凝土结构抗震设计的一般规定 .....	132
6.3 框架结构的抗震设计 .....	140
6.4 剪力墙结构的抗震设计 .....	180
6.5 框架-抗震墙结构的抗震设计 .....	200
习题 .....	205
<b>第 7 章 多高层钢结构抗震设计 .....</b>	<b>208</b>
7.1 多高层钢结构的主要震害及其分析 .....	208
7.2 多高层钢结构的选型与布置 .....	211
7.3 多高层钢结构的抗震设计方法 .....	215
7.4 多高层钢结构抗震性能化设计 .....	224
习题 .....	230
<b>第 8 章 单层工业厂房抗震设计 .....</b>	<b>231</b>
8.1 单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计 .....	231
8.2 单层钢结构厂房抗震设计 .....	251
8.3 单层砖柱厂房抗震设计 .....	258
习题 .....	264
<b>第 9 章 隔震结构与消能减震结构设计 .....</b>	<b>265</b>
9.1 结构减震控制概述 .....	265
9.2 隔震结构设计 .....	267
9.3 消能减震结构设计 .....	278
9.4 抗震、隔震及减震结构与计算工程实例 .....	299
习题 .....	303
<b>第 10 章 装配式建筑结构抗震设计 .....</b>	<b>304</b>
10.1 装配式建筑结构概述 .....	304
10.2 装配式建筑抗震设计一般规定 .....	308

10.3 装配式构件抗震设计 .....	314
10.4 装配式构件连接节点抗震设计.....	319
10.5 消能减震技术在装配式建筑中应用.....	325
习题 .....	330
<b>参考文献</b> .....	331

## 地震基础知识与抗震设防

地震是一种对人类威胁最大的自然灾害。本章主要讲述了地震的类型和成因,介绍了地震波、地震震级、地震烈度、地震强度度量指标及地震震害,阐述了工程结构的抗震设防目标、设防分类、设防标准和两阶段抗震设计方法。

### 1.1 地震的类型和成因

据统计,地球上每年发生 500 多万次地震,即每天要发生上万次地震,地震是一种很普遍的自然现象。广义地说,地震是地球表层的震动,又称地动、地震动。

#### 1.1.1 地震的类型

根据震动性质的不同,可将地震分为三类:天然地震、人工地震和脉动。

##### 1. 天然地震

天然地震是指自然界发生的地震现象。狭义而言,人们平时所说的地震是指能够形成灾害的天然地震。

天然地震又可以分为火山地震和构造地震。

(1)火山地震。火山地震是由于火山活动时岩浆喷发冲击或热力作用而引起的地震。火山地震一般较少,数量约占地震总数的 7%。

(2)构造地震。构造地震是由地壳(或岩石圈,少数发生在地壳以下的岩石圈上地幔部位)发生断层而引起的,地壳(或岩石圈)在构造运动中发生形变,当变形超过岩石的承受能力时,岩石将发生断裂,在构造运动中长期积累的能量迅速释放,造成岩石震动,从而形成地震。2011 年 3 月 11 日,日本东北部海域发生里氏 9.0 级的地震并引发海啸。世界上 90% 以上的地震和几乎所有的破坏性地震都是构造地震造成的。工程上所讨论的地震就是这种波及范围广、破坏性大且发生频率高的构造地震。

##### 2. 人工地震

人工地震是由爆破、核试验等人为因素引起的地面震动。

### 3. 脉动

脉动是大气活动、海浪冲击等原因引起的地球表层的经常性微动。

#### 1.1.2 地震的成因

构造地震是地壳的一种运动形式。但是,地壳为什么会运动?是怎么运动的?为什么会产生像地震这样的运动?要想解决这些问题,我们需要去探究地震这种现象的深层原因。地震成因是地震学科中的一个重大课题,目前有如大陆漂移学说、海底扩张学说等。现在比较流行的是大家普遍认同的板块构造学说。1965年,加拿大著名地球物理学家威尔逊(Wilson)首先提出了“板块”概念。1968年,法国地质学家勒比逊(X. LePichon)提出了“板块构造学说”,他把全球岩石圈划分成六大板块,即欧亚板块、太平洋板块、美洲板块、印度洋板块、非洲板块和南极洲板块。板块与板块的交界处既是地壳活动比较活跃的地带,也是火山、地震较为集中的地带。据资料统计,全世界85%左右的地震发生在板块边缘。板块构造学说是大陆漂移、海底扩张等学说的综合与延伸,它虽不能解决地壳运动的所有问题,但却为研究地震成因提供了理论基础。

地震带是指地震集中发生及分布的地方。地震带皆位于板块交界处或者板块内部的断裂带上。世界三大地震带分别是环太平洋地震带、欧亚地震带和大洋中脊(海岭)地震带,如图1-1所示。



视频  
构造地震和世界地震带

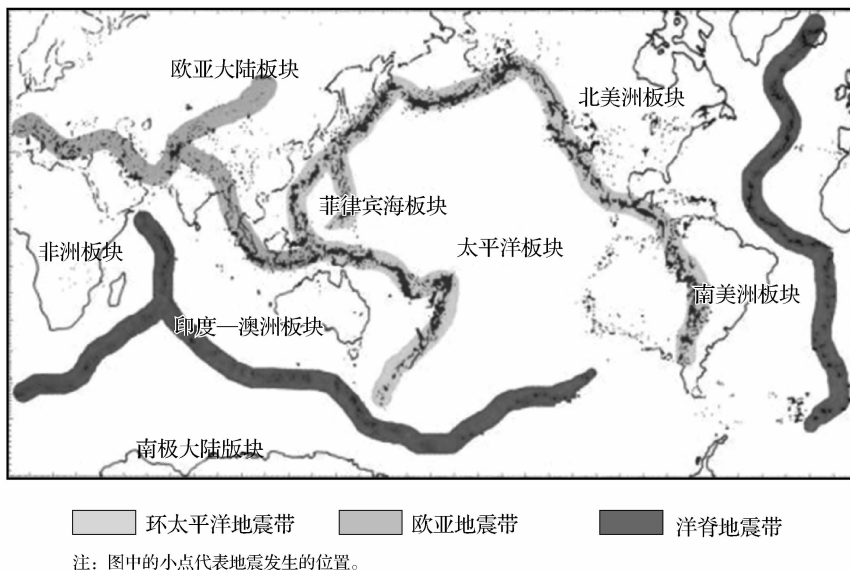


图 1-1 板块分布和世界地震带

第一大地震带是环太平洋地震带,即太平洋的周边地区,包括南美洲的智利、秘鲁,北美洲的危地马拉、墨西哥、美国等国家的西海岸,阿留申群岛、千岛群岛、日本列岛、琉球群岛以及菲律宾、印度尼西亚和新西兰等国家和地区。全世界约80%的浅源地震、90%的中源地震和几乎全部的深源地震都发生在这一带。所释放的地震能量约占全世界总能量的80%,但

其面积仅占世界地震总面积的 1/2。

第二大地震带是欧亚地震带,这是一条横跨欧亚大陆,从欧洲地中海经希腊、土耳其、我国的西藏延伸到太平洋,也称地中海—喜马拉雅地震带。全长两万多千米,跨欧、亚、非三大洲,宽度各地不一,在大陆部分常有较大的宽度,并有分支现象。环太平洋地震带外几乎所有的较大浅源地震和中源地震都发生在这一带。

第三大地震带是海岭地震带,分布在太平洋、大西洋、印度洋中的海岭(海底山脉)。它是对陆地影响最小的世界地震带。

相对于世界上地震比较多的国家,如美国西部和日本岛国,都是处在环太平洋地震带上。而我国处在环太平洋地震带和欧亚地震带两大地震带之间,是世界上地震最多、地震震害最严重的国家。

## 1.2 地震波及地震动参数

### 1.2.1 地震波

当震源岩层发生断裂和错动时,岩层所积累的能量突然释放,以波的形式从震源向四周传播,这种波称为地震波。地震波是一种弹性波,按其在地壳中的传播位置可分为体波和面波。

#### 1. 体波

体波是由震源振动并在地球内部产生和传播的地震波。体波根据其介质振动方向和波的传播方向可分为纵波(P)与横波(S)。

(1)纵波。纵波的介质质点的振动方向和波的传播方向相同,是从震源向四周传播的压缩波。纵波一般周期较短,波速较快(约为横波波速的 1.67 倍),振幅较小,可在地面上引起上下颠簸运动。纵波由于波速较快,在地震发生时往往最先到达,因此纵波也称为初波、P 波、压缩波和拉压波。纵波波速一般用  $v_p$  来表示,根据弹性动力学可以得到  $v_p$  的计算公式为

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

式中, $E$  为介质的弹性模量; $\mu$  为介质的泊松比; $\rho$  为介质的密度。

(2)横波。横波的介质质点的振动方向和波的传播方向垂直,是从震源向四周传播的剪切波。横波一般周期较长,波速较慢,振幅较大,可在地面上引起水平反方向的运动。横波由于波速较慢,在地震发生时的到达时间比纵波慢,因此横波也称为次波、S 波、剪切波和等体积波。横波波速一般用  $v_s$  来表示,根据弹性动力学可以得到  $v_s$  的计算公式为

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

式中, $G$  为介质的剪切弹性模量。

地基中常见岩土介质的密度和波速参考表 1-1。

表 1-1 地基中常见岩土介质的密度和波速

类别	名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	纵波波速 $v_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	横波波速 $v_s / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
松散层	黏土	1.60~2.04	1.2~2.5	—
	湿砂	—	0.6~0.8	—
	砂质黏土	—	0.3~0.9	—
	干砂、砾石	—	0.2~0.8	—
	饱水砂、砾石	—	1.5~2.8	—
沉积岩	砾岩	1.60~4.20	1.6~4.2	0.9~2.2
	泥质灰岩	2.45~2.65	2.0~4.4	1.2~2.4
	硅质石灰岩	2.80~2.90	4.4~4.8	2.6~3.0
	致密石灰岩	2.60~2.77	2.5~6.1	1.4~3.5
	页岩	2.30~2.70	1.3~4.0	0.8~2.3
	砂岩	2.42~2.77	2.4~4.2	0.9~2.4
	致密白云岩	2.80~3.00	2.5~5.0	1.5~3.0
	石膏	2.41~2.58	3.5~4.5	1.8~2.3
变质岩	片麻岩	2.65~2.79	6.0~6.7	3.5~4.0
	大理岩	2.68~2.72	5.8~7.3	3.5~4.7
	石英岩	2.65~2.75	3.0~6.6	2.8~3.2
	片岩	2.68~2.92	5.8~6.1	3.5~3.8
	板岩	2.31~2.75	3.6~4.5	2.1~2.8
	千枚岩	2.71~2.86	2.8~5.2	1.8~3.2
岩浆岩	花岗岩	2.30~2.80	4.5~6.5	2.3~3.8
	闪长岩	2.52~2.70	5.7~6.4	2.8~3.8
	玄武岩	2.53~3.10	4.5~8.0	3.0~4.5
	安山岩	2.30~2.75	4.1~5.6	2.5~3.3
	辉长岩	2.55~2.98	5.3~6.5	3.2~4.0
	辉绿岩	2.53~2.97	5.2~5.8	3.4~3.5
	橄榄岩	2.90~3.40	6.5~8.0	4.0~4.8
	凝灰岩	1.60~1.95	2.6~4.3	1.6~2.6
其他	水	1.00	1.4~1.6	—
	冰	0.80~0.90	3.1~3.6	—
	混凝土	2.40~2.50	2.0~4.5	1.2~2.7

## 2. 面波

面波为在地表面传播的波,又称为 L 波。它是由纵波与横波在地表相遇后激发产生的混合波。面波主要有瑞雷波和洛夫波。

瑞雷波传播时,介质质点在波的前进方向与地表法向组成的平面内做椭圆运动。洛夫波传播时,介质质点在与波的前进方向垂直的水平方向上运动,在地面上表现为蛇形运动。

面波是经过地层界面的多次反射和折射形成的次生波,其周期长、波速慢(约为横波波速的 0.9 倍)、振幅大、衰减慢,地震发生时往往最后到达。面波的介质质点的振动方向复杂,振幅比体波大,对建筑物的影响也比较大,是造成建筑物强烈破坏的主要因素。

利用纵波、横波和面波传播速度的不同,分析地震曲线上 P 波和 S 波到达的时间差,可以大致确定震源的距离。

### 1.2.2 地震动参数

地壳深处发生岩层断裂、错动的地方称为震源,它是一个区域,但研究地震时常把它看成一个点。震源在地表的投影点称为震中,也称震中位置,实际上震中并非一个点,而是一个区域。震中及其附近的地方称为震中区,也称极震区,该区域是地震破坏最强的地区。震中到地面上任意一点的水平距离叫震中距离(简称震中距)。震中距小于 100 km 的地震称为地方震,震中距为 100~1 000 km 的地震称为近震,震中距大于 1 000 km 的地震称为远震,一般来讲,震中距越长的地方受到的影响和破坏越小。震源到震中的垂直距离称为震源深度。通常将震源深度小于 60 km 的地震称为浅源地震,震源深度为 60~300 km 的地震称为中源地震,震源深度大于 300 km 的地震称为深源地震。对于同样大小的地震,由于震源深度不一样,对地面造成的破坏程度也不一样。震源越浅,破坏越大,但波及范围也越小,反之亦然。以上地震术语如图 1-2 所示。

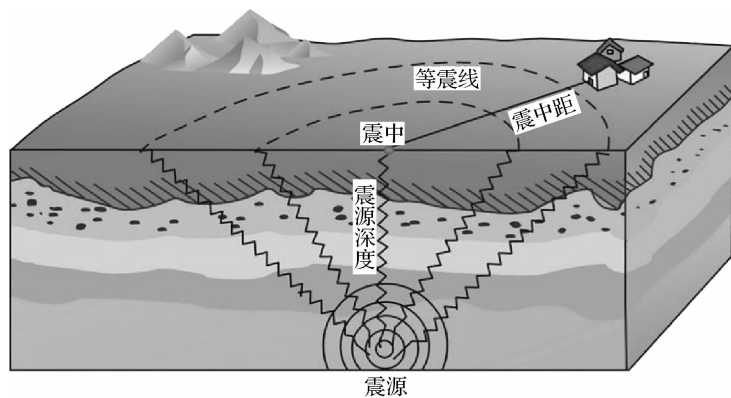


图 1-2 地震术语

地震动是由震源释放出来的地震波引起的地面运动。它是不同频率、不同震动幅值的地震波在一个有限时间范围内的集合。地震动参数表征地震引起的地面运动的物理参数,包括峰值、反应谱(加速度、速度或位移)和持续时间等。所以,通常以地震动幅值、地震动频谱特性和持续时间 3 个参数来表达地震的特点。

地震动幅值是地震振动强度的表示,通常以峰值表示的最多,如峰值加速度、峰值速度或峰值位移。峰值是指地震动的最大值。地震动峰值的大小反映了地震过程中某一时刻地震动的最大强度,它直接反映了地震力及其产生的振动能量和引起结构地震变形的大小,是

地震对结构影响大小的尺度。

地震动频谱特性就是强震地面运动对具有不同自振周期的结构的响应。反应谱是工程抗震用来表示地动频谱的一种特有的方式,这是因为它是通过单自由度体系的反应来定义的,容易被工程界接受。

强地震动的持续时间在震害及对结构的影响,主要发生在结构反应进入非线性化之后,持续时间的增加使出现较大永久变形的概率提高,持续时间越长,则反应越大,以致产生震害的积累效应。对于一般工业与民用建筑的抗震设计,利用地震动幅值(强度)即可;但对于重大工程和特殊工程,仅有幅值是不够的,还需要考虑持续时间。

1999年9月21日,我国台湾南投县集集镇发生了里氏7.6级、震源深度为7.0 km的地震。图1-3所示为地震加速度记录仪记录到的该地震动加速度时程曲线(地震波曲线)。通过对该加速度时程曲线的数字处理,可以揭示其频谱(周期)特性。该曲线的加速度幅值为 $100 \text{ cm/s}^2$ ,持续时间约为80 s,峰值处的周期(卓越周期)约为0.51 s。

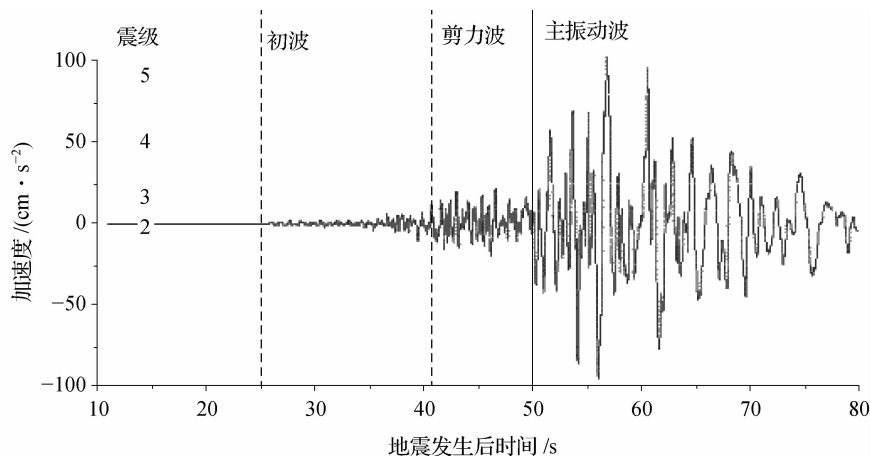


图 1-3 我国台湾南投县集集镇地震动加速度时程曲线

地震动参数划分,是以国土为背景,按照不同的地震强弱程度,以一定的标准(包括时间年限、概率水准、地震动峰值加速度、地震动反应谱特征周期等地震动参数标准)将国土划分为不同抗震设防要求的区域,并以图件的形式表示出来。地震动参数区划图展示了地区之间潜在地震危险程度的差异,设计人员可以根据地震动参数区划图上所标示的各个地区的抗震设防要求进行建设工程抗震设计。

地震动参数是工程抗震设计的依据,不同工程对工程场地地震安全性评价的深度及提供的参数的要求不同,这取决于工程的类型、安全性、危险性及社会影响等因素。

## 1.3 地震度量

地球上的地震有强有弱。用来衡量地震强度大小的标准有两个:一个是地震震级,另一个是地震烈度。

### 1.3.1 地震震级

1935年,美国地震学家里希特(C. F. Richter)首先提出了震级的概念,采



视频  
震级



用标准地震仪(周期为 0.8 s, 阻尼系数为 0.8, 放大倍数为 2 800 的地震仪)在距离震中 100 km 处记录到的以微米( $1 \mu\text{m}=10^{-6} \text{ m}$ )为单位的最大水平地面位移  $A$  的常用对数值来表示震级的大小, 即

$$M=\lg A \quad (1-3)$$

式中,  $M$  为地震震级, 通常称为里氏震级;  $A$  为由记录到的地震曲线图上得到的最大振幅。

例如, 由距离震中 100 km 处的标准地震仪记录到的最大地面位移为 1 m, 则地震震级为里氏 6 级。

由于受到当初设计里氏地震规模时所使用的伍德·安德森扭力式地震仪的限制, 当近震震级大于 6.8 或观测点距离震中超过约 600 km 时, 里氏震级标度便不适用, 因此最初的里氏震级标度只适用于近震和地方震, 所以里氏震级又称为近震震级。1945 年, 美国地震学家古登堡(B. Gutenberg)把震级的应用推广到远震和深源地震, 利用宽频带地震仪记录远震传来的面波, 根据面波的振幅和周期来计算震级, 奠定了震级体系的基础。

现在国际通用的地震震级标准仍称为里氏震级(改进后的里氏震级)。它是综合了里希特(近震震级)和古登堡(远震震级)的研究成果, 根据离震中一定距离所观测到的地震波的幅度和周期, 并且考虑从震源到观测点的地震波衰减, 通过一定公式计算出来的震源地震的大小。我国使用的震级标准就是这种国际通用的震级标准。地震按震级的分类如表 1-2 所示。

表 1-2 地震按震级的分类

类 型	震级 $M$	类 型	震级 $M$
超微震	$M < 1$	强烈地震	$6 \leq M < 7$
弱震和微震	$1 \leq M < 3$	大地震	$7 \leq M < 8$
有感地震	$3 \leq M < 4.5$	巨大(特大)地震	$M \geq 8$
中强地震	$4.5 \leq M < 6$		

震级是表征地震强弱的指标, 是划分震源释放出的能量大小的等级。地震震级直接与震源所释放能量的大小有关, 可以用式(1-4)表达。

$$\lg E=11.8+1.5M \quad (1-4)$$

式中,  $E$  为地震能量(J);  $M$  为地震震级。

从式(1-3)和式(1-4)中可以看出, 震级相差一级, 振幅相差 10 倍, 能量相差约 32 倍; 震级相差两级, 振幅相差 100 倍, 能量相差约 1 000 倍。

### 1.3.2 地震烈度

地震烈度表示地震对地表及工程建筑物破坏的强弱程度。用什么尺度衡量地震烈度呢? 在没有观测仪器的年代, 只能由地震宏观现象(如人的感觉、器物的反应、地表和建筑物的破坏程度等)总结出的宏观烈度表来定性评定地震烈度。由于定性的宏观烈度未能提供定量的数据, 因此不能直接用于工程抗震设计。随着科学技术的发展, 人们可以用强震仪记录的地面运动参数(如地面运动峰值加速度、峰值速度)来定义烈度, 从而出现了含有物理指标的定量烈度表。由于不可能随处取得强震仪的记录, 因此用定量烈度表评定地震现场的烈度还有一定的困难, 最好的方法是将定性和定量两种评定方式结合起来, 使之兼有两者的功能, 以便工程应用。目前, 我国采用的 12 度烈度表就是采用定性和定量结合的评定方法得出的。表 1-3 为 2021 年实施的中国地震烈度表。

表 1-3 中国地震烈度

地震烈度	人的感觉	房屋震害			器物反应和其他 震害现象	合成地震动的最大值	
		类型	震害现象	平均震害指数		加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
I	无感	—	—	—	—	0.018 ( $<0.0257$ )	0.00121 ( $<0.00177$ )
II	室内个别静止中的人有感觉,个别较高楼层中的人有感觉	—	—	—	—	0.0369 ( $0.0258 \sim 0.0528$ )	0.00259 ( $0.00178 \sim 0.00381$ )
III	室内少数静止中的人有感觉,少数较高楼层中的人有明显感觉	—	门、窗轻微作响	—	悬挂物微动	0.0757 ( $0.0529 \sim 0.108$ )	0.00558 ( $0.00382 \sim 0.00819$ )
IV	室内多数人、室外少数人有感觉,少数人梦中惊醒	—	门、窗作响	—	悬挂物明显摆动,器皿作响	0.155 ( $0.109 \sim 0.222$ )	0.012 ( $0.0082 \sim 0.0176$ )
V	室内绝大多数、室外多数人有感觉,多数人中惊醒,少数人梦中惊醒,少数人惊逃户外	—	门窗、屋顶、屋架颤动作响,灰土掉落,个别房屋墙体抹灰出现细微裂缝,个别老旧 A1 类或 A2 类房屋墙体出现轻微裂缝或原有裂缝扩展,个别屋顶烟囱掉砖,个别檐瓦掉落	—	悬挂物大幅度晃动,少数架上小物品、个别顶部沉重或放置不稳定性器物晃动或翻倒,水晃动并从盛满的容器中溢出	0.319 ( $0.223 \sim 0.456$ )	0.0259 ( $0.0177 \sim 0.038$ )

续表

地震烈度	人的感觉	房屋震害			器物反应和其他震害现象	合成地震动的最大值	
		类型	震害现象	平均震害指数		加速度 ( $m \cdot s^{-2}$ )	速度 ( $m \cdot s^{-1}$ )
VI	多数人站立不稳,少数人惊慌户外	A1	少数轻微破坏和中等破坏,多数基本完好	0.02~0.17	少数轻家具和物品移动,少数顶部沉重的器物翻倒。河岸和松软土出现裂缝,饱和砂土层出现喷砂冒水;个别独立砖烟囱轻度裂缝	0.683 (0.457~0.936)	0.0557 (0.0381~0.0817)
		A2	少数轻微破坏和中等破坏,多数基本完好	0.01~0.13			
		B	少数轻微破坏和中等破坏,多数基本完好	$\leq 0.11$			
		C	少数或个别轻微破坏,绝大多数基本完好	$\leq 0.06$			
		D	少数或个别轻微破坏,绝大多数基本完好	$\leq 0.04$			
VII	大多数人惊慌逃户外,骑自行车的人有感觉,行驶中的汽车驾乘人员有感觉	A1	少数严重破坏和毁坏,多数中等破坏和轻微破坏	0.15~0.44	物体从架子上掉落,多数顶部沉重的器物翻倒,少数家具倾倒;河岸出现塌方,饱和砂土层常见喷水冒砂,松软土地裂裂缝较多;大多数独立砖烟囱中等破坏	1.35 (0.937~1.94)	0.12 (0.0818~0.176)
		A2	少数中等破坏,多数轻微破坏和基本完好	0.11~0.31			
		B	少数中等破坏,多数轻微破坏和基本完好				
		C	少数中等破坏和轻微破坏,多数基本完好	0.07~0.22			
		D	少数轻微破坏和中等破坏,多数基本完好	0.04~0.16			

续表

地震烈度	人的感觉	房屋震害			器物反应和其他 震害现象	合成地震动的最大值	
		类型	震害现象	平均震害指数		加速度 ( $m \cdot s^{-2}$ )	速度 ( $m \cdot s^{-1}$ )
Ⅷ	多数人摇晃颠簸,行走困难	A1	少数毁坏,多数中等破坏和严重破坏	0.42~0.62	除重家具外,室内物品大多数倾倒或移位。干硬土上亦出现裂缝,饱和砂层绝大多数喷砂冒水;大多数独立砖烟囱严重破坏。	2.79 (1.95~4.01)	0.258 (0.177~0.378)
		A2	少数严重破坏,多数中等破坏和轻微破坏	0.29~0.46			
		B	少数严重破坏和毁坏,多数中等和轻微破坏	0.25~0.50			
		C	少数中等破坏和严重破坏,多数轻微破坏和基本完好	0.16~0.35			
		D	少数中等破坏,多数轻微破坏和基本完好	0.14~0.27			
Ⅸ	行动的人摔倒	A1	大多数毁坏和严重破坏	0.60~0.90	室内物品大多数倾倒或移位。干硬土上多处出现裂缝,可见基岩裂缝、错动、滑坡、塌方常见;独立砖烟囱多数倒塌	5.77 (4.02~8.30)	0.555 (0.379~0.814)
		A2	少数毁坏,多数严重破坏和中等破坏	0.44~0.62			
		B	少数毁坏,多数严重破坏和中等破坏	0.48~0.69			
		C	多数严重破坏和中等破坏,少数轻微破坏	0.33~0.54			
		D	少数中等破坏,多数中等破坏和轻微破坏	0.25~0.48			

续表

地震烈度	人的感觉	房屋震害			器物反应和其他 震害现象	合成地震动的最大值	
		类型	震害现象	平均震害指数		加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
X	骑自行车的人会摔倒， 处不稳状态的人会摔离 原地，有抛起感	A1	绝大多数毁坏	0.88~1.00	山崩和地震断裂出现； 大多数独立砖烟囱从根 部破坏或倒毁	11.9 (8.31~17.2)	1.19 (0.815~1.75)
		A2	大多数毁坏	0.60~0.88			
		B	大多数毁坏	0.67~0.91			
		C	大多数严重破坏和毁坏	0.52~0.84			
		D	大多数严重破坏和毁坏	0.46~0.84			
XI	—	A1	绝大多数毁坏	1.00	地震断裂延续很大，大 量山崩滑坡	24.7 (17.3~35.5)	2.57 (1.76~3.77)
		A2		0.86~1.00			
		B		0.90~1.00			
		C		0.84~1.00			
		D		0.84~1.00			
XII	—	各类	几乎全部毁坏	1.00	地面剧裂变化，山河 改观	>35.5	>3.77

注：表中给出的“加速度”和“速度”是参考值，括弧内给出的是变动范围。A1类指未经抗震设防的土木、砖木、石木等房屋；A2类指穿斗木构架房屋；B类指未经抗震设防的砖混结构房屋；C类指按照Ⅶ度（7度）抗震设防的砖混结构房屋；D类指按照Ⅷ度（8度）抗震设防的钢筋混凝土框架结构房屋。“个别”为10%以下，“少数”为10%~45%，“多数”为40%~70%，“大多数”为60%~90%，“绝大多数”为80%以上。

地震震级和地震烈度是描述地震现象的两个参数。一次地震只有一个震级,可以有不同的地震烈度。例如,地震震级好像不同瓦数的日光灯,瓦数越高,能量越大,震级越高;地震烈度好像屋子里受光亮的程度,对同一盏日光灯来说,各处距离日光灯的远近不同,受光照射的程度不同,受光亮的程度也不同。地震震级越大,震中烈度越高;离震中越远,地震烈度越低。当地震震级相同时,震源深度越浅,震中烈度越高;震源深度越深,震中烈度越低。对于浅源地震而言,地震震级与震中烈度有如表 1-4 所示的大致对应关系。依据地震震级粗略估算震中烈度的公式是  $1.5(M-1)$ 。

表 1-4 地震震级与震中烈度的大致对应关系

地震震级	2	3	4	5	6	7	8	8 以上
震中烈度	1~2	3	4~5	6~7	7~8	9~10	11	12

### 1.3.3 其他烈度

一个地区发生地震是随机事件,而地震烈度更是随机变量。随机变量只能用概率分布规律来描述。

#### 1. 基本烈度

我国地震烈度区划图上标定的基本烈度又称为第二水准烈度,其概率上的定义为一个地区在今后一定时期内(一般为 50 年)、在一般场地条件下,可能遭受的超越概率为 10% 的烈度,如图 1-4 所示。一般场地条件是指标准地基土壤、一般地形、地貌、构造、水文地质等条件。基本烈度是在地震区进行建筑设计的主要依据,有了基本烈度,才能在此基础上按建筑物的重要性根据规范选取设防标准,之后才能按规范进行工程设计。

#### 2. 抗震设防烈度

抗震设防烈度,按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。一般情况下,抗震设防烈度取 50 年内超越概率为 10% 的地震烈度(等同基本烈度),在一定条件下可采用经国家有关主管部门规定的权限批准发布的供设计采用的抗震设防区划的地震动参数(如地面运动加速度峰值、反应谱值、地震影响系数曲线和地震加速度时程曲线)。

#### 3. 众值烈度

众值烈度又称为常遇烈度、多遇烈度或第一水准烈度,是该地区 50 年内超越概率为 63.2% 的烈度,相当于概率密度曲线上峰值时的烈度。多遇烈度比基本烈度低 1.55 度。

#### 4. 罕遇烈度

罕遇烈度又称为第三水准烈度。在设计基准期内(一般为 50 年)遭遇大于基本烈度的大烈度震害的小概率事件还是可能发生的,随着基本烈度的提高,大震烈度增加的幅度有所减小,不同基本烈度对应的大震烈度的定量标准也不应相同。通过对我国 43 个城市地震危险性的分析,并结合我国经济实况,可粗略地将 50 年超越概率为 2%~3% 的烈度作为罕遇烈度。

图 1-4 所示为基本烈度、众值烈度和罕遇烈度三者之间的关系。

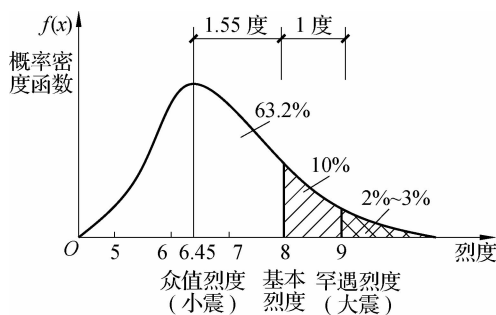


图 1-4 基本烈度、众值烈度和罕遇烈度三者之间的关系

## 1.4 地震震害

地震震害是地震作用于人类社会形成的灾难事件。地震成灾的程度既取决于地震本身的大小,还与震区场地、各类工程结构、经济社会发展和人口等条件有很大的关系。发生在无人区的大地震,一般不会造成灾害;而发生在经济发达、人口稠密地区的一次中等地震却可能造成极为严重的灾害。

地震震害是指由地震引起的强烈地面振动及伴生的地面裂缝和变形,使各类建(构)筑物倒塌和损坏,设备和设施损坏,交通、通信中断,其他生命线工程设施等被破坏,以及由此引起的火灾、爆炸、瘟疫、有毒物质泄漏、放射性污染、场地破坏等造成人畜伤亡和财产损失的灾害。一般可将地震震害分为原生灾害、次生灾害和诱发灾害。由于地震的作用而直接产生的地表破坏、各类工程结构类的破坏,以及由此而引发的人员伤亡与经济损失,称为原生(直接或一次)灾害。由于工程结构物的破坏造成的诸如地震火灾、水灾、毒气泄漏与扩散、爆炸、放射性污染、海啸、滑坡、泥石流等灾害,称为次生(二次)灾害。由地震震害引起的各种社会性灾害,如瘟疫、饥荒、社会动乱、人的心理创伤等,称为诱发(三次)灾害。有时,次生灾害造成的经济损失要远远大于原生灾害。

研究地震产生的震害是为了防范未来的大震。目前,在科学技术还不能控制地震发生的情况下,调查研究地震震害的现状,分析震害规律,总结人们预防地震和减轻地震震害的经验,是抗震设防和保证人民生命财产安全的有效途径。通常与建筑工程有关的地震震害主要有地表破坏、工程结构破坏和次生灾害。

### 1.4.1 地表破坏

地震造成的地表破坏主要有地裂缝、发震断裂错动、喷水冒砂、山石崩塌和滑坡等。

#### 1. 地裂缝

地震引起的地裂缝分为构造地裂缝和重力地裂缝两种类型。地下断层错动延伸至地面的裂缝,称为构造地裂缝。在海边、河湖岸边、古河道上以及厚的饱和松软土层地区产生的地面裂缝,称为重力地裂缝。构造地裂缝的走向与地下断裂带的走向一致,规模较大,形状比较规则,多呈带状,长度有时延续几千米甚至几十千米,裂缝宽度常达数十厘米甚至几米;重力地裂缝规模较小,大小、形状不一,宽度较小,但数量较多。

地裂缝穿过房屋会造成基础和墙体的断裂或错动,严重时会造成房屋倒塌。图 1-5 所示为 2009 年 1 月 9 日哥斯达黎加 6.2 级地震造成的地裂缝。



图 1-5 哥斯达黎加 6.2 级地震造成的地裂缝

## 2. 发震断裂错动

地震时,发震断层可能出现很大的错动,从而引起断裂带两边的地表在水平方向和竖直方向上发生相对位移,严重时可使断裂带附近的工程结构严重破坏。图 1-6 所示为我国汶川地震典型发震断裂错动地貌与地表变形量。

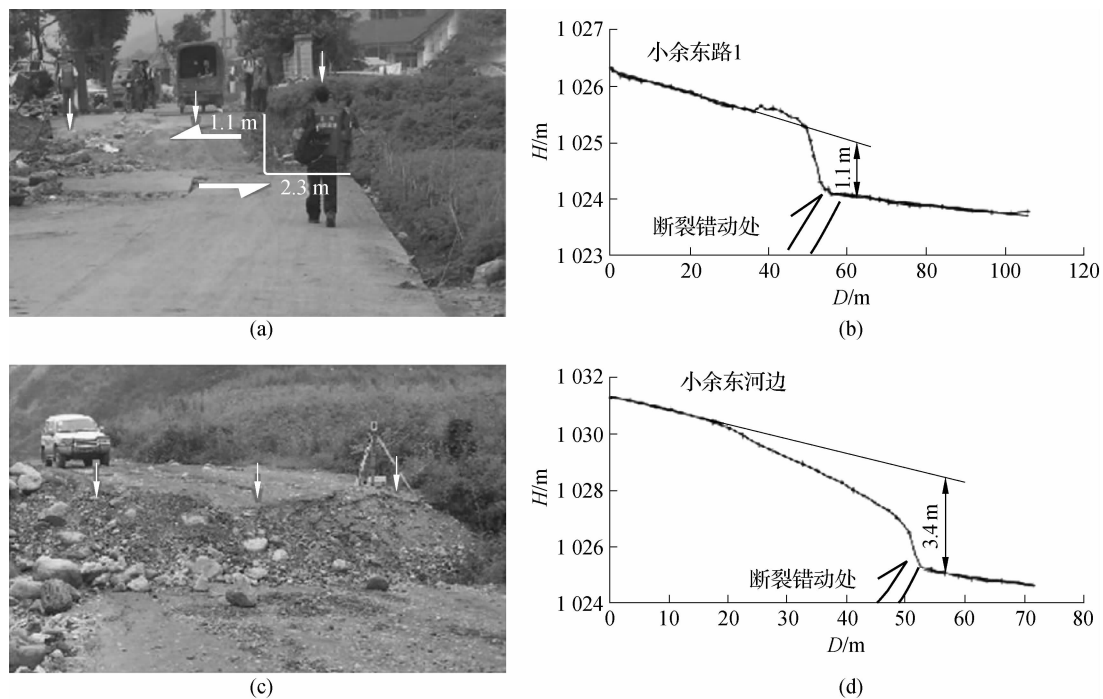


图 1-6 我国汶川地震典型发震断裂错动地貌与地表变形量

## 3. 喷水冒砂

喷水冒砂是指地震晃动过程中,在地下水位较高且含有砂土层或粉土层的地区,地震波的作用使地下水压急剧增高,随着松散饱和粒状土变密而产生高孔压区,其中的水体形成向



上的水流,当水头梯度足够大时,水流还将携带大量悬浮的土颗粒,如果顶层特别薄或者地基土中存在裂缝等缺陷,水流就会冲开地面,形成砂沸。砂沸的喷出物在喷出口周围形成圆锥形沉积,类似小的“火山口”。砂沸俗称喷水冒砂。这种现象是场地发生液化的典型特征之一。地基液化造成的土体变形可导致基础倾斜,造成生命线工程大面积破坏。图 1-7 所示为 1976 年 7 月 28 日我国唐山地震时砂土液化地面出现的喷水冒砂现象。



图 1-7 我国唐山地震时砂土液化地面出现的喷水冒砂现象

#### 4. 山石崩塌

山石崩塌主要发生在山区,由于地震的强烈振动,使得原已处于不稳定状态的山崖发生崩塌。这种灾害会造成山下的建筑物严重破坏。图 1-8 所示为汶川地震时 100 t 的山石崩塌。

#### 5. 滑坡

滑坡是指斜坡上的土体或者岩体受地震作用的影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面或者软弱带,整体地或分散地顺坡向下滑动的自然现象。运动的岩(土)体称为变位体或滑移体,剪切面称为滑移面,未移动的下伏岩(土)体称为滑床。图 1-9 所示为汶川地震时北川县城发生的两处滑坡。这两处滑坡对下面的建筑造成了巨大的影响。



图 1-8 汶川地震时 100 t 的山石崩塌



图 1-9 汶川地震时北川县城发生的两处滑坡

### 1.4.2 工程结构破坏

地震时各类结构的破坏既是导致人民生命财产损失的主要原因,也是结构工程抗震工作的主要对象。据统计,由地震破坏所造成的人员伤亡占总数的 95%。过去建造的房屋

抗震性能普遍较低,地震造成的房屋破坏情况十分严重。工程结构的破坏随结构类型及抗震措施的不同而有较大的差别,下面介绍几种常见的工程结构破坏情况。

### 1. 承重构件承载力不足或变形过大造成的破坏

建筑物在地震作用下,其承重构件因抗剪强度、抗弯强度和抗压强度不足或变形能力不够而发生破坏,严重时,可造成整幢建筑物倒塌。图 1-10 所示为 1999 年 9 月 21 日我国台湾南投县集集镇地震时某学校教学楼因底层柱的抗压承载力不足而造成整个结构破坏。图 1-11 所示为 1995 年日本阪神地震时一幢 8 层公共建筑因第 6 层变形过大而形成薄弱层,造成整层垮塌,使第 7 层直接落到了第 5 层上。



图 1-10 我国台湾南投县集集镇地震时某学校教学楼的主体结构破坏



图 1-11 日本阪神地震时某公共建筑整层破坏

### 2. 结构丧失整体性而造成的破坏

结构构件的共同工作主要依赖于构件之间的连接与支撑;如果构件间连接不牢,地震时节点发生破坏,建筑就可能丧失整体性,从而发生局部或全部倒塌。

### 3. 地基失效引起的破坏

当建筑的地基内含有饱和的砂土层、粉土层或淤泥层软土时,地震时可能发生地基液化或软土沉陷,从而使上部建筑物发生严重破坏或整体倒塌。图 1-12 所示为我国台湾南投县集集镇地震时地基失效引起的上部建筑物倾倒,但上部结构完好无损。图 1-13 所示为 1964 年 6 月 16 日日本新潟地震时砂土地基液化导致多数房屋整幢倾斜,但上部结构完好。



图 1-12 我国台湾南投县集集镇地震时地基失效造成房屋倾倒



图 1-13 日本新潟地震时砂土地基液化导致房屋倾斜

### 1.4.3 次生灾害

地震造成的次生灾害有火灾、堰塞湖、水灾和海啸等,由此引起的灾害也相当严重。例如,1923 年日本东京发生的大地震造成房屋倒塌 13 万幢,因地震引起的火灾而烧毁房屋 45 万幢。堰塞湖是由地震造成山体滑坡,堵截河谷或河床后储水而形成的湖泊。如果遇到强余震、暴雨,可能会发生溃坝,对下游百姓的生命财产造成威胁。同时,由于堰塞湖的水位不断上升,也会对上游造成淹没的危险。“5·12”汶川地震时,唐家山堰塞湖是汶川地震后形成的最大的堰塞湖。地震后因山体滑坡、阻塞河道而形成的唐家山堰塞湖位于岷河上游距北川县城约 6 km 处,是北川灾区面积最大、危险性最大的一个堰塞湖,如图 1-14 所示。

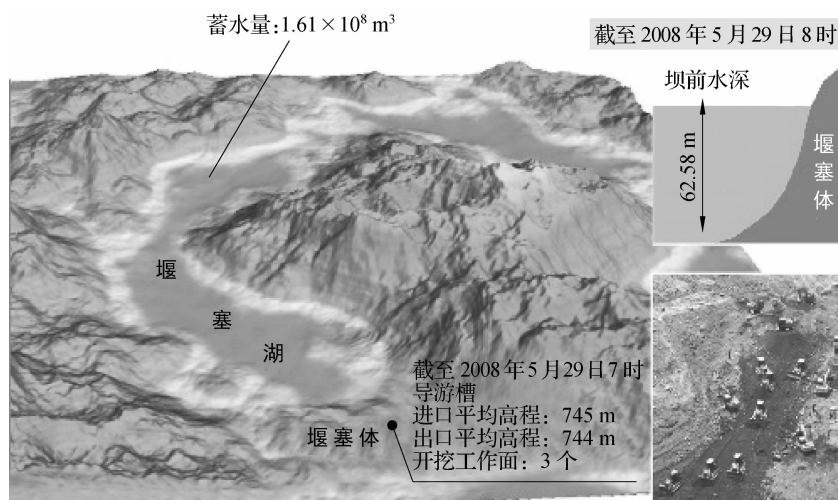


图 1-14 唐家山堰塞湖

地震引起的水坝破坏而产生的水灾也会对附近的房屋造成巨大的破坏,图 1-15 所示为我国台湾南投县集集镇地震时水坝结构被震坏。地震引起的海啸也会对海边房屋造成巨大的破坏。2011 年 3 月 11 日,日本东北部海域发生里氏 9.0 级地震并引发海啸,造成了巨大的人员伤亡和财产损失,图 1-16 所示为海啸引起的破坏。



图 1-15 我国台湾南投县集集镇地震时水坝结构被震坏



图 1-16 日本地震时海啸引起的破坏

## 1.5 工程结构的抗震设防

20 世纪以来,我国共发生 6 级以上地震近 800 次,遍布除贵州、浙江两省和香港特别行政区以外所有的省、自治区、直辖市。中国地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广,是一个震灾严重的国家。1900 年以来,我国死于地震的人数达 55 万之多,占全球地震死亡人数的 53%;1949 年以来,100 多次破坏性地震袭击了 22 个省(自治区、直辖市),其中涉及东部地区 14 个省份,造成 27 万余人丧生,占全国各类灾害死亡人数的 54%,地震成灾面积达 30 多万平方千米,房屋倒塌达 700 万间。地震及其他自然灾害的严重性构成中国的基本国情之一。

当前的科技水平尚无法预测地震的到来,未来相当长的一段时间内,地震也是无法预测的。所谓成功预测地震的例子,基本都是巧合。对于地震,我们更应该做的是提高建筑抗震等级、做好防御,而不是预测地震。

### 1.5.1 抗震设防目标

抗震设防的目的是在一定经济条件下最大限度地限制和减轻工程结构的地震破坏,避免人员伤亡,减少经济损失。为了实现这一目的,《建筑抗震设计规范(2016 年版)》(GB 50011—2010)将抗震设防目标分为基本抗震设防目标和性能化抗震设防目标。基本抗震设防目标保持和原有抗震规范一致的表述。性能化抗震设防目标采用比基本抗震设防目标更具体或更高的要求。对特殊建筑结构、重要的结构部位或构件应采用性能化抗震设防目标。

基本抗震设防目标就是所有进行抗震设计的建筑都必须实现的目标,可概括为“三水准设防目标”。

第一水准设防目标为当遭受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震影响时,主体结构不受损坏或不需修理仍可继续使用,简称“小震不坏”,即结构处于正常使用状态,可视为弹性体系。

第二水准设防目标为当遭受相当于本地区抗震设防烈度的设防地震影响时,主体结构可能发生损坏,经一般性修理仍可继续使用,简称“中震可修”,即结构进入非弹性阶段,但非弹性变形或结构的损坏控制在可修复的范围内。

第三水准设防目标为当遭受高于本地区设防烈度的预估的罕遇地震影响时,主体结构不致倒塌或发生危及生命的严重破坏,简称“大震不倒”,即结构虽然有较大的非弹性变形,但已控制在规定范围内,能免于倒塌。

对于使用功能或其他方面有专门要求的建筑、特别不规则的建筑或超限建筑结构,当采用抗震性能化设计时(见本书 2.2 节的内容),具有比“三水准设防目标”更具体或更高要求的抗震设防目标。

### 1.5.2 建筑抗震设防分类和设防标准

《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB 55002—2021)根据建筑遭遇地震破坏后,可能造成人员伤亡、直接和间接经济损失、社会影响的程度及其在抗震救灾中的作用等因素,对各类建筑所做的设防类别进行了划分。对于不同重要性的建筑,采用不同的抗震设防

标准(衡量抗震设防要求高低的尺度,由抗震设防烈度或设计地震动参数及建筑抗震设防类别确定)。

(1)建筑抗震设防类别的划分,应根据下列因素的综合分析确定:

- ①建筑破坏造成的人员伤亡、经济损失及社会影响的大小。
- ②城镇的大小、行业的特点和工矿企业的规模。
- ③建筑使用功能失效后,对全局的影响范围大小、抗震救灾影响及恢复的难易程度。
- ④当建筑各区段的重要性有显著不同时,可按区段划分抗震设防类别。下部区段的类别不应低于上部区段的类别。

⑤不同行业的相同建筑,当所处地位及地震破坏所产生的后果和影响不同时,其抗震设防类别可不相同。

**注意:**区段是指由防震缝分开的结构单元、平面内使用功能不同的部分或上下使用功能不同的部分。

(2)建筑工程应分为以下四个抗震设防类别:

①特殊设防类。特殊设防类是指使用上有特殊要求的设施,涉及国家公共安全的重大建筑工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果,需要进行特殊设防的建筑工程,简称甲类。

②重点设防类。重点设防类是指地震时使用功能不能中断或需尽快恢复的生命线相关建筑,以及地震时可能导致大量人员伤亡等重大灾害后果,需要提高设防标准的建筑,简称乙类。

③标准设防类。标准设防类是指大量的除①、②、④款以外按标准要求进行设防的建筑,简称丙类。

④适度设防类。适度设防类是指使用上人员稀少且震损不致产生次生灾害,允许在一定条件下适度降低设防要求的建筑,简称丁类。

(3)各抗震设防类别建筑的抗震设防标准,应符合下列要求:

①标准设防类,应按本地区抗震设防烈度确定其抗震措施和地震作用,达到在遭遇高于当地抗震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安全的严重破坏的抗震设防目标。

②重点设防类,应按高于本地区抗震设防烈度提高一度的要求加强其抗震措施;但抗震设防烈度为 9 度时应按比 9 度更高的要求采取抗震措施;地基基础的抗震措施应符合有关规定。同时,应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用。

③特殊设防类,应按本地区抗震设防烈度提高一度的要求加强其抗震措施;但抗震设防烈度为 9 度时应按比 9 度更高的要求采取抗震措施。同时,应按批准的地震安全性评价的结果且高于本地区抗震设防烈度的要求确定其地震作用。

④适度设防类,允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低其抗震措施,但抗震设防烈度为 6 度时不应降低。一般情况下,仍应按本地区抗震设防烈度确定其地震作用。

⑤当工程场地为 I 类时,对特殊设防类和重点设防类工程,允许按本地区设防烈度的要求采取抗震构造措施;对标准设防类工程,抗震构造措施允许按本地区设防烈度降低一度、但不得低于 6 度的要求采用。

各类建筑抗震设防标准的比较见表 1-5。

表 1-5 各类建筑抗震设防标准比较

设防类别	设防标准	
	抗震措施	地震作用
标准设防类	X	X
重点设防类	X+1	X
特殊设防类	X+1	>X
适度设防类	<X	X

注:1. 假设当地的设防烈度为 X;

2. 抗震措施是指除地震作用计算和抗力计算以外的抗震设计内容,包括抗震构造措施;

3. 抗震构造措施是根据抗震概念设计原则,一般不需计算而对结构和非结构各部分必须采取的各种细部要求;

4. 地震作用,由地震动引起的结构动态作用,包括水平地震作用和竖向地震作用。

**注意:**对于划为重点设防类而规模很小的工业建筑,当改用抗震性能较好的材料且符合抗震设计规范对结构体系的要求时,允许按标准设防类设防。

### 1.5.3 两阶段抗震设计方法

为达到三水准设防目标,相关规范规定应采用两阶段抗震设计方法:

第一阶段设计是承载力验算,取第一水准的地震动参数计算结构的弹性地震作用标准值和相应的地震作用效应,并引入承载力抗震调整系数,进行构件截面设计,从而满足第一水准的强度要求。同时,采用同一地震动参数计算结构的弹性层间位移角,使其既不超过规定的限制,又满足第二水准的损坏可修的目标。对大多数的结构,可只进行第一阶段设计,而通过概念设计和抗震构造措施来满足第三水准设防目标的设计要求。

第二阶段设计是弹塑性变形验算,对地震时易倒塌的结构、有明显薄弱层的不规则结构及有专门要求的建筑,除进行第一阶段设计外,还要进行结构薄弱部位的弹塑性层间变形验算并采取相应的抗震构造措施,实现第三水准设防目标的设防要求。

## 习 题

1. 地震按照成因分为哪几类? 工程抗震设防考虑的是哪一类地震?
2. 什么是地震波? 地震波有哪几种? 各类地震波的传播特点是什么?
3. 震级和烈度的定义是什么? 它们之间的关系是什么?
4. 地震震害有哪些?
5. 抗震设防目标有哪些?
6. 建筑抗震设防分类和设防标准是什么?
7. 什么是两阶段抗震设计方法?