



世纪高等教育土木工程系列规划教材

# 工程结构 抗震设计

郭仕群 吴传文 王亚莉 等编著

Seismic Design of Engineering Structure



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等教育土木工程系列规划教材

# 工程结构抗震设计

郭仕群 吴传文 王亚莉 等编著



本书是根据全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程专业的培养要求和住建部高等教育土木工程专业认证要求,依据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范(2016年版)》等现行规范和规程编写的。全书共 10 章,包括地震基本知识及抗震设防,场地、地基和基础抗震设计,结构地震反应分析与抗震验算,抗震概念设计,多、高层钢筋混凝土结构抗震设计,砌体结构抗震设计,钢结构抗震设计,单层工业厂房抗震设计,桥梁结构抗震,隔震和消能减震设计。各章章首均有学习要求,章后有本章小结,并附有多种类型的习题。

本书可作为高等学校土木工程专业结构抗震课程的教材,也可供从事建筑结构抗震设计、研究和施工的技术人员参考。

本书配有 PPT 课件、工程结构抗震素材包及习题答案,采用本书的教师可登录机械工业出版社教育服务网([www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com))注册,免费下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程结构抗震设计/郭仕群,吴传文,王亚莉等编著. —北京:机械工业出版社,2018.1

21 世纪高等教育土木工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-58569-5

I. ①工… II. ①郭… ②吴… ③王… III. ①建筑结构-防震设计-高等学校-教材 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 293482 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 责任校对:刘 岚

封面设计:张 静 责任印制:李 昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·23.25 印张·568 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58569-5

定价:59.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

我国处于世界上最活跃的两大地震带上，近 100 年来遭遇多次大震强震，海城地震、唐山地震、汶川地震等均造成了巨大的人员伤亡和经济损失，因此我国土木工程技术人员防震减灾的任务非常艰巨。基于大学教育要以“厚基础、宽口径、高素质、强能力”的指导思想来培养学生，本书以“加强基础、强化概念、紧靠规范、增强实用指导、反映当代研究成果、拓宽知识面”为编写的指导思想。为了配合 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范（2016 年版）》等的颁布执行，并适应工程抗震设计思想与方法的不断发展，同时考虑到工程抗震是一门交叉性学科，它广泛地涉及了地球物理学、地质学、地震学、结构动力学、工程结构学等多方面的知识，结合多年在工程抗震方面的教学与科研实践，吸取工程抗震方面的最新研究成果和汶川地震的经验教训，编写了本书。本书在内容体系上具有以下特色：

1. 加强了结构抗震的基础理论知识、基本原理及分析方法，使学生能将已有的数学、力学基础应用到本专业课程的学习中来，包括对振动原理的理解、对结构抗震的力学分析等。

2. 着重将理论知识用于指导工程设计的实践工作中，结合规范相关条文进行了实际工程应用中的相关说明，使学生能在理解基本原理的基础上应用所学理论，完成工程实践的各种要求。

3. 紧密结合现行规范介绍了建筑抗震性能化设计的基本概念，并介绍了工程抗震、结构隔震、减震等研究的最新进展，以开阔学生的视野，为土木工程专业学生的进一步学习深造打下基础。

4. 方便教师和学生有针对性地教学和自学，各章均编写了学习要求、本章小结和习题，配有 PPT 课件、素材包和习题解答等资源，并在主要章节编有计算实例。

本书共 10 章，第 1、2 章由郭仕群、郭文编写，第 3~5 章由郭仕群编写，第 6 章由吴译文编写，第 7 章由王亚莉编写，第 8~10 章由郭仕群、许立英编写。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者不吝指正（Guoshiquan@swust.edu.cn）。

作 者



# 目 录

## 前 言

<b>第 1 章 地震基本知识与抗震设防</b> .....	1
1.1 地震成因与类型.....	1
1.2 地震震害、常用术语.....	4
1.3 地震波、震级与烈度.....	7
1.4 工程结构抗震设防.....	12
本章小结.....	17
习题.....	17
<b>第 2 章 场地、地基和基础抗震设计</b> .....	19
2.1 场地.....	19
2.2 地基与基础的抗震设计及验算.....	25
2.3 液化地基和软土地基.....	27
2.4 桩基抗震设计.....	36
本章小结.....	38
习题.....	38
<b>第 3 章 结构地震反应分析与抗震验算</b> .....	42
3.1 地震作用的性质、特点及分析方法.....	42
3.2 单自由度弹性体系的地震反应分析与抗震设计反应谱.....	43
3.3 多质点体系的地震反应分析.....	53
3.4 多自由度弹性体系地震反应分析的振型分解法.....	59
3.5 水平地震作用扭转影响的地震效应.....	70
3.6 结构地震反应的时程分析法.....	74
3.7 结构静力弹塑性分析法概述.....	78
3.8 水平地震作用下地基与结构的相互作用.....	80
3.9 结构自振周期和振型计算.....	82
3.10 结构竖向地震作用效应计算.....	86
3.11 地震作用的一般规定及结构抗震验算.....	89
3.12 建筑抗震性能化设计.....	98
本章小结.....	103
习题.....	104

<b>第 4 章 抗震概念设计</b> .....	106
4.1 概述 .....	106
4.2 选择有利于抗震的场地 .....	107
4.3 选择有利于抗震的地基和基础 .....	107
4.4 选择合理的抗震结构体系 .....	107
4.5 选择有利于抗震的建筑平面和立面形式 .....	108
4.6 选择合理的结构构件 .....	113
4.7 注意非结构构件和主体结构的关系 .....	113
4.8 注意材料的选用和施工质量 .....	114
本章小结 .....	115
习题 .....	115
<b>第 5 章 多、高层钢筋混凝土结构抗震设计</b> .....	118
5.1 震害及其分析 .....	118
5.2 抗震设计的基本要求 .....	122
5.3 框架结构抗震设计 .....	136
5.4 框架-抗震墙结构的抗震设计 .....	159
本章小结 .....	171
习题 .....	171
<b>第 6 章 砌体结构抗震设计</b> .....	175
6.1 概述 .....	175
6.2 震害现象及其分析 .....	176
6.3 抗震设计的一般规定 .....	183
6.4 多层砌体结构房屋的抗震计算 .....	186
6.5 多层砌体结构房屋的抗震构造措施 .....	197
6.6 多层砌体结构房屋的抗震设计实例 .....	203
6.7 底部框架-抗震墙砌体房屋的抗震计算及构造措施 .....	211
本章小结 .....	217
习题 .....	217
<b>第 7 章 钢结构抗震设计</b> .....	221
7.1 震害现象及其分析 .....	221
7.2 钢结构的抗震概念设计 .....	225
7.3 多层和高层钢结构房屋的抗震设计 .....	231
7.4 多层钢结构厂房的抗震设计 .....	244
7.5 网架结构抗震设计 .....	247
本章小结 .....	254
习题 .....	254
<b>第 8 章 单层工业厂房抗震设计</b> .....	256
8.1 单层工业厂房的震害特征 .....	256
8.2 单层工业厂房的结构布置 .....	260
8.3 单层钢筋混凝土柱厂房的抗震计算 .....	264

## 工程结构抗震设计

8.4 单层钢结构厂房的抗震计算	282
8.5 单层砖柱厂房的抗震计算	284
8.6 单层工业厂房的抗震构造措施	286
本章小结	296
习题	296

## 第9章 桥梁结构抗震

9.1 桥梁的震害	299
9.2 桥梁抗震计算的地震力理论及抗震设计方法的演变	308
9.3 公路桥梁抗震设防要求	311
9.4 桥梁结构地震作用计算	316
9.5 桥梁结构抗震验算	321
9.6 桥梁的延性抗震设计简介	324
本章小结	332
习题	333

## 第10章 隔震和消能减震设计

10.1 概述	335
10.2 隔震结构设计	336
10.3 耗能减震结构设计	350
10.4 桥梁结构减震、隔震介绍	357
本章小结	360
习题	360

## 参考文献

363



# 地震基本知识与抗震设防 第1章

## 学习要求:

- 了解地震基本知识和震害。
- 掌握地震波、震级和地震烈度等概念。
- 掌握建筑抗震设防分类标准。
- 深刻理解三水准设防目标和两阶段抗震设计方法。

## 1.1 地震成因与类型

地震是与地球内部构造,尤其是与地表结构密切相关的一种自然现象。其中大地震对人类社会构成严重威胁。一次突发性的大地震能让城市在数十秒内变成一片废墟,成片房屋破坏倒塌,交通、通信、供水、供电等生命线中断,并可能引发火灾、疾病等次生灾害,人员大量伤亡,城市瘫痪,并导致严重的经济损失。世界上破坏性的强地震平均每年约 18 次。本节主要介绍一些有关地震的基本知识。

### 1.1.1 地震成因

地球是一个实心椭圆形球体,其赤道半径为 6378km,简单地可分为地壳、地幔、地核三部分(图 1.1)。地球内部的温度是随距地表面深度增加而递增的,深度每增加 1km 温度

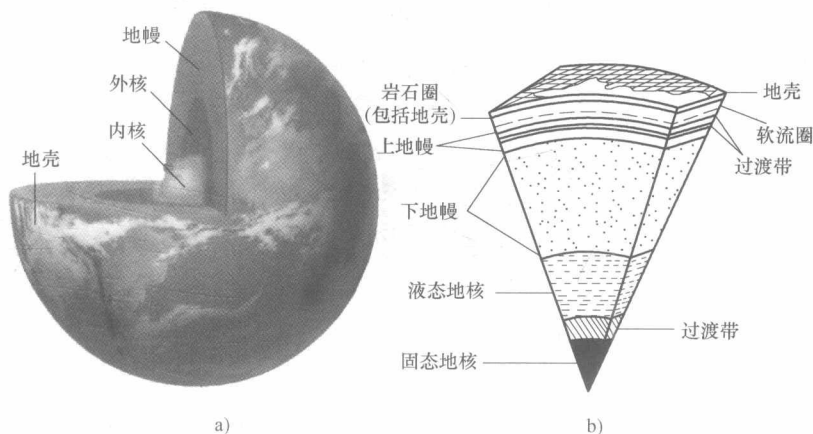


图 1.1 地球的构造

a) 地球断面 b) 分层结构

约升高  $30^{\circ}\text{C}$ 。但增长率随着深度增加而减小。地球内部的压力也是随着距地表面的深度增加而增加的。有资料表明,地幔外部的压力约为  $90\text{kN}/\text{cm}^2$ ,地核外部的压力约为  $14000\text{kN}/\text{cm}^2$ ,地核中的压力约为  $37000\text{kN}/\text{cm}^2$ 。这些差别使得地壳不可避免地产生局部变形,而这种变形积累到一定程度,就会引起突变,爆发地震。

地震成因的研究已有近百年历史,主要有两个观点,一是断层破裂学说(主要是弹性回跳学说),另一个是板块运动学说。实际上这两个观点并不矛盾,主要是出发点不同,前者是从局部机制,而后者是从宏观背景来论述震源机制的。

弹性回跳学说认为地壳是由弹性的、有断层的岩层组成的,地壳运动(如上升、下沉,或倾斜)产生的能量以弹性应变能的形式在断层及其附近岩层中长期积累,原始水平状态的岩层(图 1.2a)就会发生形变,当作用力只能使岩层产生弯曲而没有丧失其连续完整性时,岩层只发生褶皱(图 1.2b),但当岩层脆弱部分岩石强度承受不了强大力的作用时,岩层便产生了断裂和错动(图 1.2c),即断层上某一点两侧岩体向相反方向突然滑动,地震因此产生。弹性回跳学说对地壳为何发生运动,弹性应变能怎样积聚等宏观原因没有给以说明,而板块学说则正好说明了这一点。板块学说认为,地球构造中的地幔软流物质的涌出与对流,促使板块的构造运动,当两个板块相遇时,其中一个板块俯冲插入另一个板块之下,在这个过程中,板块内的复杂应力状态引起其本身与附近地壳和岩石层的脆性破裂而发生地震。这就是全球大部分地震均发生在板块边缘及其附近的原因。另一方面,软流层与板块之间的界面是很不平坦的,且软流层本身仍具有较大刚度,因此造成板块内部的复杂应力状态和不均匀变形,这是发生板块内地震的根本原因。而板块内的岩体断层则提供了发生地震的内在条件。据统计,全球 85% 左右的地震发生于板块边界地带,仅有 15% 左右发生于大陆内部或板块内部。

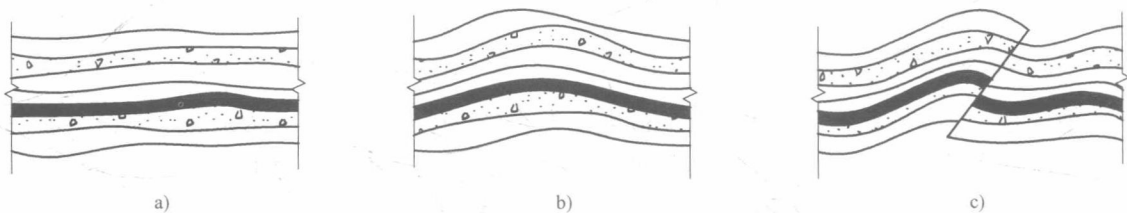


图 1.2 地壳构造变动与地震形成示意图

a) 岩层原始状态 b) 受力后发生褶皱变形 c) 岩层断裂产生振动

地震使得构造运动过程中积累起来的应变得得到释放,地震波只是地震能量的一小部分,大部分变为热能。关于地震成因还有其他一些学说,但在地壳或地幔上部岩层在力的作用达到极限时,岩石发生破裂引起地震这一点上是基本一致的。

### 1.1.2 地震的类型

根据地震成因,地震可分为天然地震和诱发地震。天然地震包括构造地震、火山地震、塌陷地震。诱发地震包括水库地震、油田注水地震、爆炸地震和机械振动等人类活动诱发的地震。

构造地震有两种情况,一是由于地壳的缓慢变形,组成全球地壳的六大板块之间发生碰撞、插入等突变,形成地壳的震动,即形成第一种构造地震。它都发生在各板块的边缘或沿

海的岛屿。我国的台湾岛和日本都位于大板块的交界处，所以是多地震的地区。二是由于地球内外层构造的巨大差异，地区之间也有很大差别，板块内部也会产生不均匀的应变，首先在地质构造不均匀处或薄弱处发生地层的错动或崩裂而形成地震，这是另一种构造地震。一般认为，这是主要的地震原因，并且释放的能量影响范围也很广。虽然后一种构造地震发生的概率较低，但有时其强度很大。如1976年的唐山大地震，在几十秒钟时间内，将一座用了近百年时间才建设起来的工业城市几乎夷为平地。

构造地震约占地震总数的90%，其特点是震源较浅、活动频繁、延续时间长、影响范围广、给人类带来的损失最严重。

构造地震按其地震序列可分为孤立型地震（前震、余震少而弱，地震能量几乎全部通过主震释放出来）、主震型地震（前震很少或无，但余震很多，90%以上地震能量通过主震释放出来）、震群型地震（没有突出的主震，地震能量通过若干次震级相近的地震分批释放出来）。

由于火山爆发时，岩浆猛烈冲击地面时引起地面振动，也能造成地震，即所谓的火山地震。它相对于前两种构造地震来说，其能量和影响都要小很多。火山地震约占发生地震的7%。

塌陷地震是地表或地下岩层较大的地下溶洞或古旧矿坑等突然发生大规模的陷落或崩塌引起的小范围内的地面震动；爆炸地震、水库地震和油田注水诱发地震是由爆炸、水库蓄水、深井注水等引起的地面震动。诱发地震引起的地震震级很小，对人类基本不构成威胁。

### 1.1.3 地震的分布

#### 1. 全球地震带

世界上有两条主要的地震带：环太平洋地震带与欧亚地震带，如图1.3所示。

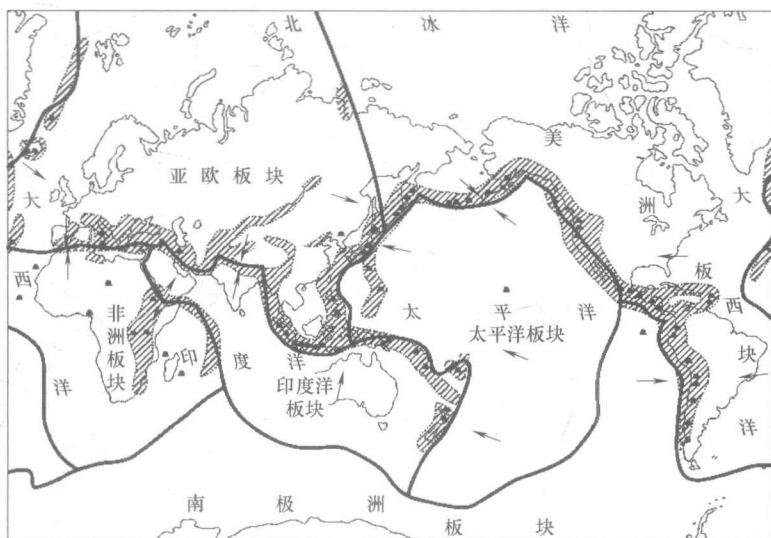


图 1.3 全球板块及两大地震带分布图

环太平洋地震带基本上是太平洋沿岸大陆海岸线的连线，从南美洲的西海岸向北，到北美洲的西海岸的北端，再向西穿过阿留申群岛，到俄罗斯的堪察加半岛折向千岛群岛，沿日



本列岛，地震带在此分为两支，一支沿琉球群岛南下，经过我国台湾省，到菲律宾、印度尼西亚；另一支转向马里亚纳群岛至新几内亚，两支汇合后，经所罗门到汤加，再突然转向新西兰。全世界75%左右的地震发生于这一地震带。

欧亚地震带是东西走向的地震带，西端从大西洋上的亚速尔岛起，向东途经意大利、希腊、土耳其、伊朗、印度，再进入我国西部与西南地区，向南经过缅甸与印度尼西亚，最后与环太平洋地震带的新几内亚相接。这一地震带是全球中、深源地震的多发地区，全世界22%左右的地震发生于这一地震带。

另外，在大西洋、印度洋等大洋的中部也有呈条状分布的地震带。

## 2. 我国境内的地震带

从地震发生位置的地理环境上看，全球地震可分为海洋地震和大陆地震两大类，其中发生在海洋的海洋地震占85%；发生在陆地的大陆地震占15%。但由于大陆是全球人类主要的聚居地，因此地球上的地震灾害绝大部分来自大陆地震。根据20世纪以来的地震灾害统计，大陆地震造成的地震灾害占全球地震灾害的85%。

我国恰恰是大陆地震最多的国家。根据20世纪以来有仪器记录资料的统计，我国占全球大陆地震的33%。我国平均每年发生30次5级以上地震，6次6级以上强震，1次7级以上大震。我国不仅地震频次高，而且地震强度极大。根据日本地震学家阿部胜征的研究，20世纪全球发生的面波震级大于等于8.5级的特别巨大地震一共有3次，即1920年中国宁夏海原8.6级、1950年中国西藏察隅8.6级和1960年智利南方省8.5级地震。可见我国的地震不但在世界上最多，而且最大。加之我国地震分布广泛（除浙江和贵州）两省之外，其余各省均有6级以上强震发生，震源很浅（一般只有10~20km），因而构成了我国地震活动频度高、强度大、分布广、震源浅的特征。我国几个地震活动较为强烈的地区是：青藏高原和云南、四川西部，华北太行山和京津唐地区，新疆及甘肃、宁夏，福建和广东沿海，台湾地区等。

我国东邻太平洋地震带，南接欧亚地震带，地震分布相当广泛，并且其中的地震大多数属于板内地震。从我国境内6级和6级以上地震震中分布来看，我国的主要地震带有两条：

1) 南北地震带。北起贺兰山，向南经六盘山，穿越秦岭沿川西至云南省东北部，纵贯南北。地震带宽度各处不一，大致在十至百余千米左右，分界线是由一系列规模很大的断裂带和断陷盆地组成，构造相当复杂。

2) 东西地震带。主要有两条，北面的一条沿陕西、山西、河北北部向东延伸，直至辽宁北部的千山一带；南面的一条自帕米尔起，经昆仑山、秦岭，直至大别山区。

由此，我国大致可划分为六个地震活动区：台湾及其附近海域、喜马拉雅山脉活动区、南北地震带、天山地震活动区、华北地震活动区、东南沿海地震活动区。

## 1.2 地震震害、常用术语

地震发生时及发生后，将引起自然和人工环境的变化，同时人们会有震动的感觉，通常将这些称为地震影响（地震后的宏观现象）。研究这些现象，不仅可以理解地震作用本质，更主要的目的是防止或减少地震产生的破坏与人民生命财产的损失。其中对工程结构物破坏

的研究, 不仅能定性地理解地震现象, 而且可以总结经验教训, 为制订和改进抗震设计规范以及制订抗震防灾对策等措施提供依据。

### 1.2.1 地表破坏

地震造成的地表破坏主要有山石崩裂、滑坡、地陷、地面裂缝和喷水冒砂等。

地震造成的山石崩裂的塌方量可达近百万立方米, 石块最大的能超过房屋的体积, 崩塌的石块可阻塞公路, 使交通中断, 并且在陡坡附近还会发生滑坡现象。如 2001 年萨尔瓦多 7.6 级地震引发了巨大的泥石流, 数百户人家被埋在泥石里, 估计有 1200 多人遇难 (图 1.4)。

地陷大多发生在岩溶洞和采掘的地下坑道地区。在喷水冒砂的地段, 也可能发生塌陷。

地裂缝的数量、长短、深浅等与地震的强度、地表情况、受力特征等因素有关。它可以是不受地形地貌影响的构造裂缝, 其走向与地下断裂带一致, 规模较大 (裂缝带长可达几千米到几十千米, 带宽约几米到几十米) (图 1.5); 也可以是受地形地貌及土质条件影响的非构造裂缝, 这种裂缝大多沿河岸边、陡坡边缘、沟坑四周和埋藏的古河道分布, 往往和喷水冒砂现象伴生。它穿过建筑物时会造成墙体和基础的断裂或错动, 严重时会造成房屋的倒塌 (图 1.6、图 1.7)。



图 1.4 萨尔瓦多地震引发的泥石流

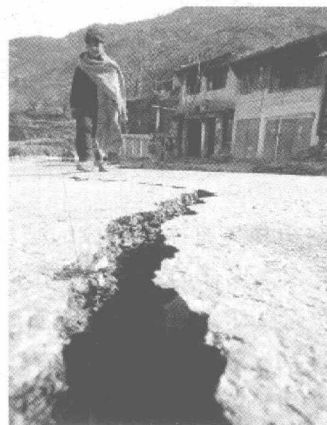


图 1.5 2003 年巴基斯坦地震造成地面裂缝



图 1.6 地面喷水冒砂



图 1.7 房屋倾斜倒塌

### 1.2.2 工程结构的破坏

工程结构的破坏情况与结构类型、抗震措施等有关，结构破坏情况主要有以下几种：

(1) 承重结构承载力不足或变形过大造成的破坏（图 1.8、图 1.9） 地震时，地震力作用在建筑物或构筑物上，使其内力和变形大量增加，并且常常改变了结构的受力形式，导致其因承载力不足或变形过大而破坏。如多层砖房的典型震害是纵、横墙墙面出现 X 裂缝、纵横墙开裂和屋顶塌落等；多高层钢筋混凝土房屋的典型震害为梁柱节点破坏，柱子上混凝土保护层脱落，钢筋外崩、呈灯笼状，特别是当箍筋的数量不足时，这种情况更是常见，钢筋混凝土墙的破坏形态和砖墙差不多，主要差别是裂缝比较分散，缝宽比较窄；钢筋混凝土厂房的破坏形态有屋面板掉落，柱顶连接破坏，阶形柱上段破坏折断，导致屋顶塌落。



图 1.8 被地震破坏的民房



图 1.9 地震造成的房屋倒塌

(2) 结构丧失整体性造成的破坏 结构构件共同工作是依靠各构件之间的连接及各构件之间的支撑来保证的。在地震作用下，节点强度不足、延性不够、锚固质量差等会使结构丧失整体性而破坏。如多高层钢筋混凝土房屋的梁柱节点破坏。

(3) 地基失效引起的破坏 在强烈地震作用下，一些建筑物上部结构无损坏，但可能因地基承载力下降或地基土液化等造成建筑物倾斜、倒塌（图 1.10）。

### 1.2.3 地震次生灾害

地震造成的主要次生灾害有水灾、火灾、毒气污染、滑坡、泥石流和海啸等，由此引起的破坏也相当严重。例如，1923 年 9 月 1 日日本关东大地震，直接震倒房屋 13 万栋，而火灾烧毁房屋达 45 万栋。

次生灾害的另一个表现是海啸。海底发生大地震能激起巨大的海浪，传到海岸形成几十米高的巨浪而形成海啸。如 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊岛发生的 8.9 级地震引起的海啸造成 30 多万人死亡和无数人无家可归，波及东南亚多个国家。

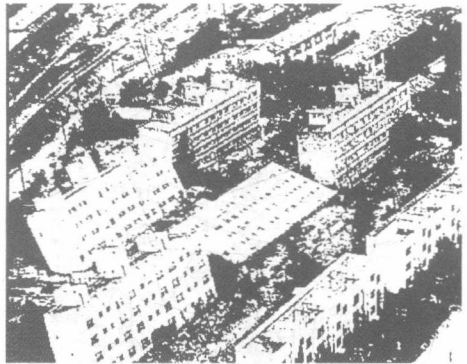


图 1.10 日本新潟地震中的地基液化



### 1.2.4 地震常用术语

(1) 震源 在地质构造运动中,在断层形成的地方大量释放能量,产生剧烈振动,此处就叫作震源(图 1.11)。震源不是一个点,而是有一定深度和范围的。强烈地震的能量大大超过原子弹爆炸。它不仅对一个城市的地上、地下产生毁灭性破坏,对周围地区也具有很大的破坏力。例如唐山地震时,对距离唐山近 100km 的天津市的地上设施产生了严重的破坏,还引起许多地基失效、喷水冒砂等,对 150km 之外的北京市也产生了许多破坏。

(2) 震源深度 震源到地面的垂直距离称为震源深度,按震源的深浅可分为浅震(震源深度  $h < 70\text{km}$ )、中深震( $70\text{km} < h < 300\text{km}$ )、深震( $h > 300\text{km}$ )。

(3) 震中 震源正上方的地面位置叫震中。震中周围地区称为震中区。

(4) 极震区 地震时震动最剧烈、破坏最严重的地区称为极震区,一般位于震中附近。

(5) 震中距 地面某处到震中的距离称为震中距。

(6) 震源距 某一指定点至地震震源的距离称为震源距。

(7) 等震线 一次地震中,在其波及的地区内,根据烈度表可以对每一个地点评估出一个烈度,烈度相同点的外包线称为等震线。

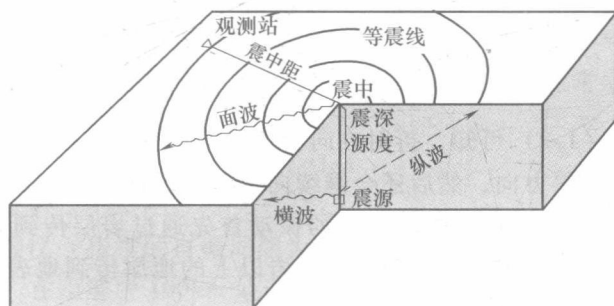


图 1.11 震中与震源

## 1.3 地震波、震级与烈度

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播并释放能量,这就是地震波。地震波可以看作是一种弹性波,它主要包含在地球内部传播的体波和只限于在地面附近传播的面波。

### 1.3.1 体波

体波包括纵波和横波两种。纵波是由震源向外传递的胀缩波,其质点的振动方向与波的前进方向一致,声波就是在空气里的一种典型纵波,它的特点是周期短、振幅小;横波是由震源向外传递的剪切波,质点的振动方向与波的前进方向垂直,一般表现为周期较长、振幅较大(图 1.12)。还应指出,横波只能在固体里传播,而纵波在固体、液体和气体里都能传播。

根据弹性理论,纵波的传播速度  $v_p$  与横波的传播速度  $v_s$  有以下关系

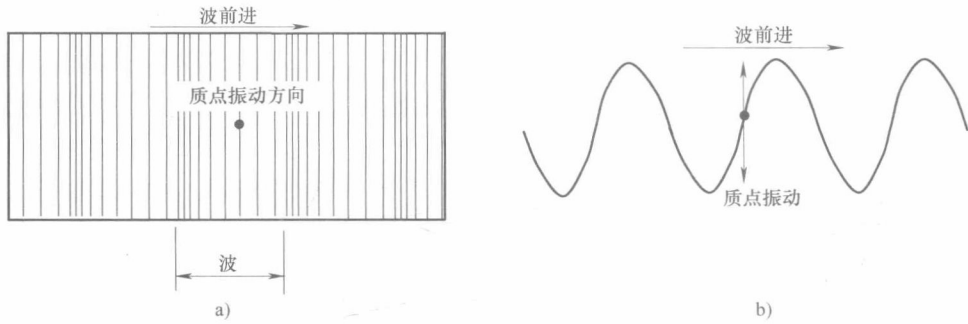


图 1.12 体波质点振动形式

a) 压缩波 b) 剪切波

$$v_p = 1.67v_s \quad (1.1)$$

由此可见，纵波的传播速度要比横波的传播速度快。因此，通常又把纵波叫作 P 波（即初波），把横波叫作 S 波（即次波）。

体波在地球中的传播速度随着深度的增加而加快，并且由于地球的层状构造特点，体波通过分层介质时，将在界面上反复发生反射和折射，若波的射线由震源出发时与垂直方向的夹角是  $\theta_1$ ，波速  $v_1$ ，折射后的夹角是  $\theta_2$ ，波速是  $v_2$ ，则有下列关系式

$$\frac{v_1}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{\sin\theta_2} \quad (1.2)$$

由于  $v_2 > v_1$ ，由式 (1.2) 可知，折射方向会逐渐向水平方向弯曲，直到速度增大到  $v_2 = v_1 / \sin\theta_1$  时，射线弯到水平方向，然后还会继续向上弯。因此在地表面，对纵波感觉是上下动，对横波感觉是水平动。此外由震源发出的振动首先通过岩层传到基岩表面（此间 S 波速度变化不大），然后，基岩表面的振动再经基岩以上的地层传到地表面，在此过程中由于重复反射，地表面的振动常常得到放大。

### 1.3.2 面波

面波只限于沿着地球表面传播，一般可以说是体波经地层界面多次反射形成的次生波，它包含瑞雷波和洛夫波两种类型。

瑞雷波传播时，质点在波的传播方向和自由面（即地表面）法向组成的平面内（图 1.13a 中的  $xOz$  平面）做与波前进方向相反的椭圆运动，而在与该平面垂直的水平方向（ $y$

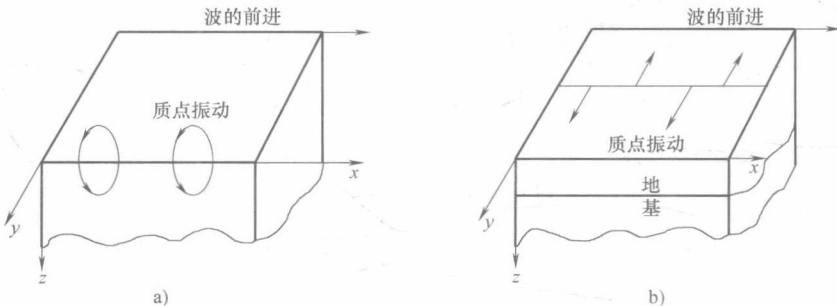


图 1.13 面波质点振动形式

a) 瑞雷波质点振动 b) 洛夫波质点振动

方向)没有振动,故瑞雷波在地面上呈滚动形式(图 1.13a)。瑞雷波具有随着距地面深度增加其振幅急剧减小的特性,这可能是地震时地下建筑物比地上建筑物受害较轻的一个原因。

洛夫波传播时质点在地平面内做与波前进方向垂直的水平方向( $y$ 方向)的运动,即在地面上呈蛇形运动形式(图 1.13b)。洛夫波也随深度而衰减。

面波振幅大,周期长,比体波衰减慢,故能传播到很远的地方。

综上所述,地震波的传播以纵波最快,横波次之,面波最慢。所以在任意一地震波的记录图上(图 1.14),纵波总是最先到达,横波次之,面波到达最晚,但后者的振幅却最大。地震现象表明,纵波使建筑物产生上下颠簸,横波使建筑物产生水平方向摇晃,面波则使建筑物既产生上下颠簸又产生左右摇晃,一般是在横波和面波都到达时振动最为激烈。由于面波的能量要比体波大,所以对建筑物和地表的破坏主要以面波为主。

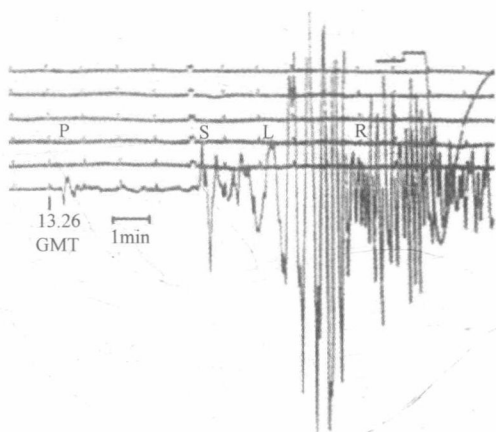


图 1.14 地震波记录

### 1.3.3 震级

震级是表示一次地震本身强弱程度和大小的尺度。震级标度通常应用美国地震学家里克特(C·F·Richter)提出的以下计算公式

$$M = \lg A \quad (1.3)$$

式中  $M$ ——地震震级;

$A$ ——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)在距震中 100km 处记录的以微米( $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ )为单位的最大水平地动位移(单振幅)。

例如,在距离震中 100km 处地震仪记录的振幅是 1mm,即 1000 $\mu\text{m}$ ,其常用对数为 3,则这次地震的震级就是里氏 3 级。

实际上,地震时距震中恰好 100km 处不一定设置了标准地震仪,因此,如果测量地点和使用的地震仪与以上规定不同时,应当对测得的值进行适当修正。

震级表示一次地震释放能量的多少,一次地震只有一个震级。震级与地震释放能量  $E$  (erg,  $1\text{erg} = 10^{-7}\text{J}$ ) 之间有如下关系

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (1.4)$$

上式表明,震级增加一级,地震波的振幅值增加 10 倍,地震释放出的能量约增加 30 多倍。所以震级给人们的一般概念是:4 级以下地震为有感地震,5、6 级地震将造成一定的破坏,7 级以上的地震将造成严重破坏。

### 1.3.4 地震烈度

震级与震源在地震过程中释放的能量有关。相同震级的地震,随着震源深度的不同,考察地点离震中的距离和场地条件不同,同一次地震对不同地点的地表和建筑物的破坏也不相同。因此地震烈度是对一定地点地震强弱程度的总评价。一次地震只有一个震级,但地面上



的烈度却是因地而异的，一般都有若干个。一般来说，离震中越远，地震影响越小、烈度就越低；反之，越靠近震中，烈度就越高。此外，震中烈度一般可看作是地震大小和震源深度两者的函数，但发生最多的地震震源深度为 10~30km，因此可以近似认为震源深度不变来进行震中烈度  $I_0$  与震级  $M$  之间关系的研究。根据全国范围内既有的地震资料，《中国地震目录》（1983 年版）给出了根据宏观资料估定震级的经验公式

$$M = 0.58I_0 + 1.5 \quad (1.5)$$

表 1.1 给出了震源深度为 10~30km 时，震级  $M$  与震中烈度  $I_0$  的大致对应关系。

表 1.1 震级  $M$  与震中烈度  $I_0$  的关系

震级 $M$	2	3	4	5	6	7	8	8 以上
震中烈度 $I_0$	1~2	3	4~5	6~7	7~8	9~10	11	12

为了说明某次地震的影响程度，总结震害经验，分析、比较建筑物的抗震性能，需要根据一定的标准来确定某地区的烈度；同样，为了对地震区的工程建设进行抗震设防，也要求研究、预测某一地区在今后一定期限的烈度，作为强度验算和采取抗震措施的根据。因此可以说，与震级相比较，烈度与抗震工作有着更为密切的关系。

为了评定地震烈度，需要建立一个标准，这个标准就称为地震烈度表。它是以描述震害宏观现象为主的，即根据人的感觉、器物的反应、建筑物的损坏程度和地貌变化特征等宏观现象进行判定和区分。由于对烈度影响轻重的分段不同，以及在宏观现象和定量指标确定方面的差异，各国制定的地震烈度表也有所不同。现在，除了日本采用 0~7 度共 8 等的烈度表，绝大多数国家包括我国都采用分成 12 度的地震烈度表。我国 2008 年公布的地震烈度表如下：

表 1.2 中国地震烈度表（GB/T 17742—2008）

地震烈度	人的感觉	房屋震害			其他震害现象	水平向地震动参数	
		类型	震害程度	平均震害指数		峰值加速度 $m/s^2$	峰值速度 $m/s$
I	无感	—	—	—	—	—	—
II	室内个别静止中的人有感觉	—	—	—	—	—	—
III	室内少数静止中的人有感觉	—	门窗轻微作响	—	悬挂物微动	—	—
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	—	悬挂物明显摇动，器皿作响	—	—
V	室内绝大多数、室外多数人有感觉，多数人梦中惊醒	—	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，个别屋顶烟囱掉砖	—	悬挂物大幅度晃动，不稳定器物摇动或翻倒	0.31 (0.22~0.44)	0.03 (0.02~0.04)