

高职高专规划教材

抗震结构设计

李达 主编 郑洪勇 昌永红 副主编



化学工业出版社

高职高专规划

抗震结构设计

李达 主编 郑洪勇 昌永红 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)(2008年版)及《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)编写而成,内容包括:地震与地震动的基本知识,场地、地基和基础的抗震设计,结构地震反应分析与抗震验算,多层和高层钢筋混凝土房屋的抗震设计,多层砌体房屋和底部框架、内框架房屋的抗震设计,多层和高层钢结构房屋的抗震设计,单层工业厂房的抗震设计,桥梁结构的抗震设计,以及隔震、减震房屋设计。书中设有例题、思考题和习题以及各章提要和小结。

本书为高职高专土建类专业及相关专业教材,也可作为成人教育土建类及相关专业的教材,还可供从事建筑工程技术等工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

抗震结构设计/李达主编. —北京:化学工业出版社,
2009.12

高职高专规划教材

ISBN 978-7-122-07058-6

I. 抗… II. 李… III. 建筑结构-抗震设计-高等学校:
技术学院-教材 IV. TU352.104

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第204016号

责任编辑:李仙华 卓丽 王文峡
责任校对:陈静

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张14½ 字数372千字 2010年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

前 言

《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》中指出，高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分，其特点是：以培养高等技术应用性专门人才为根本任务；以适应社会需要为目标、以培养技术应用能力为主线设计学生的知识、能力、素质结构和培养方案，毕业生应具有基础理论知识适度、技术应用能力强、知识面较宽、素质高等特点；以“应用”为主旨和特征构建课程和教学内容体系。在课程建设和教材建设上，要按照突出应用性、实践性的原则重组课程结构，更新教学内容。教学内容要突出基础理论知识的应用和实践能力培养，基础理论教学要以应用为目的，以必需、够用为度；专业课教学要加强针对性和实用性。本教材就是根据高等学校土建学科教学指导委员会高等职业教育专业委员会制定的建筑工程技术专业的教育标准、培养方案及本门课程教学基本要求编写的。

地震是一种突发性的自然灾害，会给人民生命和财产造成巨大损失。我国是地震多发国家之一，地震区分布广大，所以，结构抗震设计是建筑设计的重要内容。结构抗震是一门多学科性、综合性很强的学科，它涉及地球物理学、地质学、地震学、结构动力学及工程结构学等学科。随着学科研究的深入，尤其是震害经验的不断积累，结构抗震设计的新理论、新方法不断出现，建筑抗震设计规范是结构抗震设计新理论、新方法的集中体现。本教材即是以《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)(2008年版)及《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)等规范为依据进行编写。

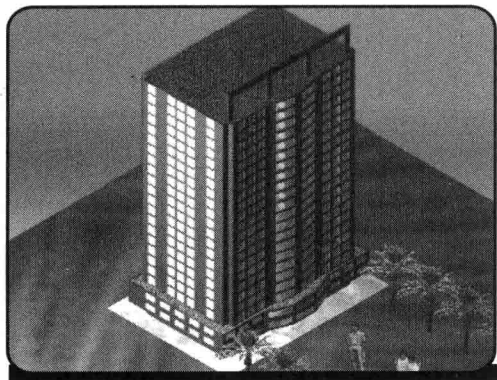
“抗震结构设计”与“钢筋混凝土结构”、“钢结构”、“砌体结构”及“地基与基础”等课程之间联系密切，是一门实践性很强的专业课程。本教材紧密联系实际，力求文字简练，重点突出，紧密依据相关规范，既有基本理论讲解又有实践训练环节。本教材详细阐述了建筑结构抗震设计的基本概念和抗震设计原理，结构抗震设计的基本方法和适用范围；介绍了地基与基础的抗震设计问题，对混凝土结构、砌体结构、钢结构、厂房结构、桥梁结构等抗震设计的设计过程和构造要求进行了讲解；阐述了工程结构隔震与消能减震等内容。为突出应用，本书有详细的设计步骤和相当数量的例题、思考题和习题。

本书由李达担任主编，郑洪勇、昌永红担任副主编。具体编写分工如下：郑洪勇（太原大学）编写第一、七章，邓光（辽宁科技学院）编写第二、九章，李达（阳泉职业技术学院）编写第三章，张艳梅（辽宁科技大学）编写第四章，昌永红（辽宁建筑职业技术学院）编写第五章，彭正斌（山东工业职业学院）编写第六章，安静（山西交通职业技术学院）编写第八章。全书由李达统稿。

编写过程中参阅了有关文献资料，在此向这些文献作者谨表感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

本书提供有电子教案，可发信到 cipedu@163.com 邮箱免费获取。



高职高专土建类专业教材编审委员会

主任委员 陈安生 毛桂平

副主任委员 汪 绯 蒋红焰 陈东佐 李 达 金 文

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

蔡红新	常保光	陈安生	陈东佐	窦嘉纲	冯 斌
冯秀军	龚小兰	顾期斌	何慧荣	洪军明	胡建琴
黄利涛	黄敏敏	蒋红焰	金 文	李春燕	李 达
李棕京	李 伟	李小敏	李自林	刘昌云	刘冬梅
刘国华	刘玉清	刘志红	毛桂平	孟胜国	潘炳玉
邵英秀	石云志	史 华	宋小壮	汤玉文	唐 新
汪 绯	汪 葵	汪 洋	王 波	王崇革	王 刚
王庆春	王锁荣	吴继锋	夏占国	肖凯成	谢延友
徐广舒	徐秀香	杨国立	杨建华	余 斌	曾学礼
张苏俊	张宪江	张小平	张宜松	张轶群	赵建军
赵 磊	赵中极	郑惠虹	郑建华	钟汉华	

目 录

第一章 绪论	1	思考题	24
第一节 地震与地震活动	1	习题	24
一、地震的基础知识	1	第三章 结构地震反应分析与抗震验算	26
二、地震活动	2	第一节 概述	26
第二节 地震强度与地震区划	4	一、地震反应及地震作用	26
一、地震强度	4	二、结构抗震设计理论的发展	27
二、地震区划	6	三、结构动力计算简图及体系自由度	27
第三节 地震的活动性与地震震害	7	第二节 单自由度弹性体系的地震反应分析	
一、地震的活动性	7	与设计反应谱	28
二、地震震害	7	一、单自由度弹性体系的地震反应分析	28
第四节 工程抗震设防	8	二、单自由度弹性体系水平地震作用及反	
一、三水准的抗震设防准则	8	应谱法	31
二、二阶段的抗震设计方法	9	第三节 多自由度体系的地震反应分析	36
三、建筑物重要性分类和设防标准	9	一、多自由度体系的运动方程	36
第五节 抗震设计的总体要求	10	二、多自由度体系的自振频率与振型	
一、建筑场地的选择	10	分析	37
二、地基和基础	10	三、振型分解法	39
三、建筑结构的规则性	11	第四节 多自由度体系的水平地震作用	
四、抗震结构体系的选择	11	计算	41
五、结构构件及连接的要求	12	一、振型分解反应谱法	41
六、处理好非结构构件	12	二、底部剪力法	42
七、结构分析	12	第五节 结构自振频率的实用计算方法	46
八、结构材料与施工质量	12	一、能量法	46
小结	13	二、折算质量法	47
思考题	14	三、顶点位移法	48
第二章 场地、地基和基础	15	四、实用周期计算方法	49
第一节 场地	15	第六节 考虑扭转和地基与结构相互作用	
一、场地及其对地震破坏的影响	15	影响的水平地震作用计算	50
二、场地类别的划分	16	一、考虑扭转的水平地震作用计算	50
第二节 天然地基和基础的抗震验算	18	二、考虑地基与结构相互作用影响的水平	
一、天然地基和基础的抗震设计原则	18	地震作用计算	52
二、天然地基和基础的抗震验算	18	第七节 结构的竖向地震作用计算	52
第三节 液化土和软土地基	19	一、高层建筑与高耸结构的竖向地震作用	
一、液化土地基	19	计算	53
二、软土地基的抗震措施	22	二、大跨度结构的竖向地震作用计算	53
第四节 桩基的抗震设计	23	第八节 结构非弹性地震反应分析简介	54
一、抗震设计的原则	23	一、非弹性时程分析方法	54
二、桩基的抗震验算	23	二、结构静力弹塑性分析	55
小结	24	第九节 结构抗震验算	56

一、结构抗震验算的一般原则	56	二、底部框架-抗震墙房屋的震害及其分析	107
二、结构抗震计算方法的确定	57	三、内框架房屋的震害及其分析	107
三、截面抗震验算	57	第二节 抗震设计的一般规定	109
四、多遇地震作用下结构的弹性变形验算	58	一、砌体房屋总高度及层数	109
五、罕遇地震作用下结构的弹塑性变形验算	59	二、结构布置	109
小结	61	三、房屋的最大高宽比	110
思考题	61	四、抗震横墙的间距	111
习题	62	五、房屋局部尺寸	111
第四章 多层和高层钢筋混凝土房屋的抗震设计	63	第三节 多层砌体房屋的抗震设计	111
第一节 震害现象及其分析	63	一、计算简图	112
一、结构布置不合理引起的震害	63	二、楼层地震剪力的计算与分配	112
二、场地影响产生的震害	64	三、墙体抗震强度验算	114
三、框架结构的震害	65	四、抗震构造措施	115
四、抗震墙的震害	66	第四节 底部框架-抗震墙房屋的抗震设计	120
第二节 抗震设计的一般规定	66	一、底部框架-抗震墙房屋的抗震设计要点	120
一、结构体系选择及最大适用高度	66	二、底部框架-抗震墙房屋的抗震构造措施	122
二、钢筋混凝土结构的抗震等级	67	第五节 内框架房屋的抗震设计	123
三、防震缝的设置	69	一、多排柱内框架房屋的抗震设计要点	123
四、建筑设计和建筑结构的规则性	69	二、多排柱内框架房屋的抗震构造措施	124
五、结构布置	69	第六节 抗震设计实例	124
第三节 框架结构的抗震设计	71	小结	127
一、地震作用计算	71	思考题	127
二、框架内力和侧移的计算	71	习题	128
三、框架结构截面抗震验算	78	第六章 多层和高层钢结构房屋的抗震设计	129
四、框架结构的抗震构造措施	83	第一节 多高层钢结构建筑主要震害现象及其分析	129
第四节 抗震墙结构的抗震设计	88	一、多高层钢结构的主要震害特征	129
一、抗震墙的破坏形态	88	二、钢结构房屋的抗震性能	132
二、抗震墙的内力设计值	89	第二节 抗震设计的一般规定	133
三、抗震墙结构的抗震构造措施	90	一、多高层钢结构的体系与结构布置	133
第五节 框架-抗震墙结构的抗震设计	92	二、钢结构房屋的结构选型	136
一、框架-抗震墙结构设计的基本思想	92	三、结构的平、立面布置	137
二、基本假定及计算简图	93	四、结构布置的其他要求	139
三、框架-抗震墙结构简化计算要点	94	第三节 多层和高层钢结构房屋的抗震设计	139
四、框架-抗震墙结构的截面抗震验算	96	一、一般计算原则	139
五、框架-抗震墙结构的抗震构造措施	97	二、地震作用下钢结构的内力与位移计算	140
第六节 抗震设计实例	98	三、钢结构构件与连接的抗震承载力	
小结	102		
思考题	102		
习题	102		
第五章 多层砌体房屋和底部框架、内框架房屋的抗震设计	104		
第一节 震害现象及其分析	104		
一、多层砌体房屋的震害及其分析	105		

验算	142	思考题	180
第四节 多层钢结构房屋的抗震构造		第八章 桥梁结构的抗震设计	181
要求	145	第一节 震害现象及其分析	181
一、钢框架结构抗震构造措施	145	第二节 抗震设计的一般规定	183
二、钢框架-中心支撑结构抗震构造措施	149	一、桥梁结构抗震设防的目标、分类和标准	183
三、钢框架-偏心支撑结构抗震构造措施	150	二、抗震设计的一般规定	184
第五节 多层钢结构厂房抗震设计	152	第三节 桥梁工程抗震设计	185
一、多层钢结构厂房的结构体系与布置	152	一、桥梁抗震设计流程	185
二、多层钢结构厂房的抗震计算要点	153	二、抗震概念设计	186
三、多层钢结构厂房的抗震构造措施	154	三、桥梁延性抗震设计	189
小结	154	四、地震反应分析	192
思考题	154	五、强度变形与验算	194
第七章 单层工业厂房的抗震设计	156	六、抗震措施	196
第一节 震害现象及其分析	156	七、特殊桥梁抗震设计	196
一、单层钢筋混凝土柱厂房	156	小结	199
二、单层钢结构厂房	158	思考题	199
三、单层砖柱厂房	159	第九章 隔震、减震房屋设计	200
第二节 抗震设计的一般规定	160	第一节 概述	200
一、单层钢筋混凝土柱厂房抗震设计的一般规定	160	第二节 隔震结构设计	201
二、单层钢结构厂房抗震设计的一般规定	161	一、隔震设计原理	201
三、单层砖柱厂房抗震设计的一般规定	161	二、隔震层的设置要求	201
第三节 单层钢筋混凝土柱厂房的抗震设计	162	三、基础隔震装置的分类	202
一、地震作用分析	162	四、隔震体系的计算方法	203
二、截面抗震验算	166	五、结构的隔震措施	204
三、抗震构造措施	169	第三节 减震结构设计	206
第四节 单层钢结构厂房的抗震设计	172	一、减震设计原理	206
一、地震作用计算和截面抗震验算	172	二、减震层的设置要求	206
二、抗震构造措施	173	三、减震体系的计算方法	207
第五节 单层砖柱厂房的抗震设计	175	四、结构的减震措施	208
一、地震作用计算和截面抗震验算	175	小结	208
二、抗震构造措施	177	思考题	208
小结	179	附录	209
		附录 A 中国地震烈度表(2008年)	209
		附录 B 我国主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震分组	211
		参考文献	221

第一章 绪 论

【知识目标】

- 了解地震的基础知识、地震的成因与类型以及世界和我国的地震活动概况
- 理解地震区划及地震的活动性与地震震害，理解概念设计的重要性
- 掌握地震波的特点及地震强度的度量，掌握三水准设防目标和两阶段设计方法
- 掌握建筑物的重要性分类和抗震设防标准

【能力目标】

- 能解释地震成因与类型，能说出世界及我国的地震活动概况
- 能解释地震波的特点及震级、烈度的概念，能根据三水准设防目标和两阶段设计方法进行工程抗震设防
- 能根据建筑物的重要性分类采用不同的抗震设防标准

开章语 地震是一种灾害性的自然现象。根据统计，全世界每年发生大约 500 多万次地震。其中绝大部分地震是人们感觉不到的微小地震，只有灵敏的仪器才能测量到它们的活动；人们能感觉到的地震称为有感地震，占地震总数的 1% 左右；能够造成灾害的强烈地震为数更少，平均每年发生十几次。强烈的地震会引起地震区地面的剧烈摇晃和颠簸，并会危及人民生命财产安全和造成工程建筑物的破坏。此外还可能引起海啸、火灾、水灾、滑坡塌方、泥石流等次生灾害，这些都会给人类造成灾难。

第一节 地震与地震活动

一、地震的基础知识

1. 地球的构造

地球是一个平均半径约 6370km 的近似球体的椭球体。从物质成分和构造特征来划分，地球可以分为三大部分（图 1-1）：地表面很薄的一层叫地壳，平均厚度 30~40km；中间很厚的一层叫地幔，厚度约 2900km；最里面的一层叫地核，半径约 3500km。

地壳是地球的外壳，由各种不均匀的岩石组成。地壳的下界称为莫霍界面，或者莫霍不连续面，是一个地震波传播速度发生急剧变化的不连续面。地壳各处厚薄不一，相差也很大，约为 5~70km。

地壳以下到约 2895km 的古登堡界面为止的部分称为地幔，约占地球体积的 5/6。地幔主要由质地坚硬的黑色橄榄岩组成。地幔的岩石层以下存在着一个厚约几百公里的软流层，该层物质呈塑性状态并且具有黏弹性性质。由于温度和压力分布的不均匀，就发生了地幔内部物质的对流，地幔内的物质就是在这样的热状态与不平衡的压力作用下缓慢地流动着。古登堡界面以下直到地心的部分称为地核，地核可分为内核和外核，主要构成物质是镍和铁。

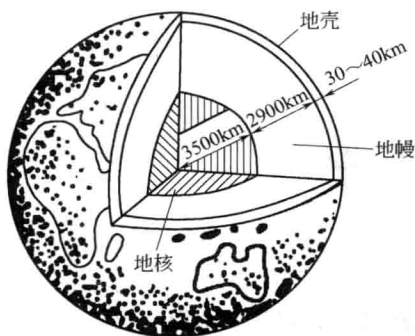


图 1-1 地球的构造

2. 地震的成因与类型

从地震的成因来分，可以分为构造地震、火山地震、塌陷地震三种。

构造地震是由于地应力在某一地区逐渐增加，岩石变形也不断增加到一定程度，在岩石比较薄的地方突然发生断裂错动，原来积累的应变能突然释放，以波的形式在地层中传播，这就产生了地震。构造地震占地震发生总数的 90% 以上，工程上通常讨论的就是构造地震。

火山地震是指由于火山喷发，岩浆猛烈冲出地面而引起的地震。这类地震一般强度不大，影响范

围和造成破坏的程度均比较小，主要分布在环太平洋、地中海以及东非等地带，其数量约占全球地震总数的 7% 左右。

塌陷地震是由于地表或地下岩层，突然发生大规模的陷落和崩塌时所引起的小范围内的地面震动。塌陷地震主要由重力引起，其释放的能量与波及的范围均很小，主要发生在石灰岩地区较大的地下溶洞或古旧矿坑地质条件的地区，数量约占全球地震总数的 3% 左右。

此外，人工爆破、矿山开采、水库储水、深井注水等原因也可引发地震，称诱发地震。

地震就是地球内部某处岩层突然破裂，或者局部岩层塌陷、火山爆发等发生了震动，并以波的形式传到地表引起地面的颠簸和摇晃，从而引起地面的运动。图 1-2 描述了地震空间位置的常用术语。发生地震的地方叫震源。震源在地表的投影叫震中。震源至地面的垂直距离叫震源深度。地面某处到震源的距离称为震源距。震中周围地区称为震中区。地震时震动最剧烈、破坏最严重的地区称为极震区，极震区一般位于震中附近。

通常把震源深度在 60km 以内的地震叫浅源地震，60~300km 以内的地震叫中源地震，300km 以上的地震叫深源地震。世界上的绝大部分地震都是浅源地震，震源深度集中在 5~20km 左右，中源地震比较少，而深源地震为数更少。一般来说，对于同样大小的地震，当震源较浅时波及范围较小，而破坏程度较大；反之则波及范围较大，破坏程度相对较小。破坏性地震一般是浅源地震。如唐山地震（1976 年 7 月 28 日）和汶川地震（2008 年 5 月 12 日）的震源深度均为 10~20km 左右。目前世界上记录到的最深的地震，震源深度约为 700km。

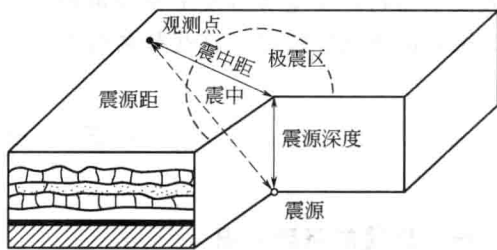


图 1-2 地震术语示意图

二、地震活动

1. 世界的地震活动

地震是一种随机现象，但从统计的角度，地震的时空分布呈现某种规律性。在地理位置上，地震震中呈带状分布，集中于一定的区域；在时间过程上，地震活动疏密交替，能够区分出相对活跃期和相对平静期。

20 世纪初，科学家们在遍访各大洲、进行宏观地震资料调查的基础上，编制了世界地震活动图。以后，又根据地震台的观测数据编出了较精确的世界地震分布图，见图 1-3。从图中可以看到，地球上以下两个主要地震带：

(1) 环太平洋地震带 该地震带的地震活动最强，全球约 80% 的浅源地震和 90% 的中

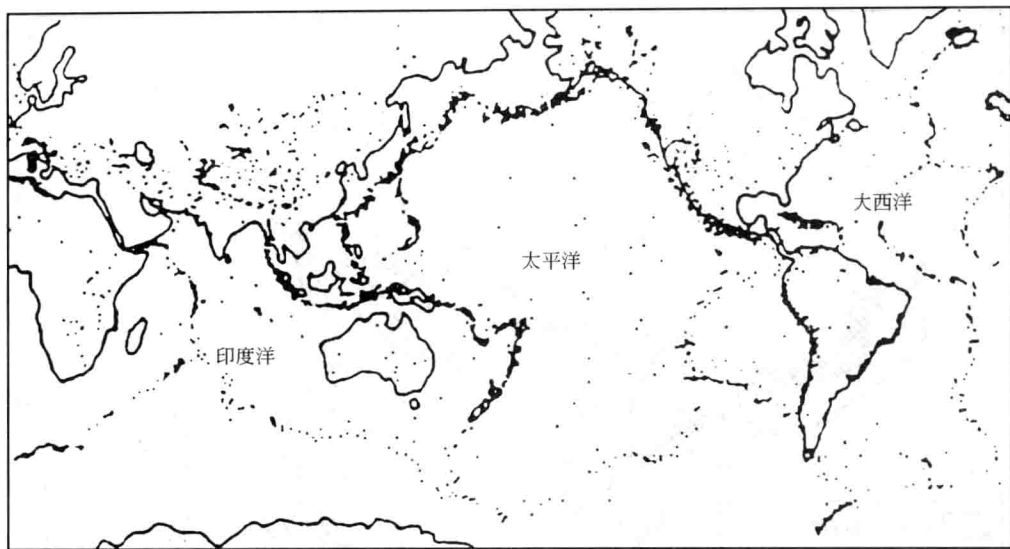


图 1-3 世界地震震中分布略图

源地震，以及几乎所有的深源地震都集中在这一地震带。它沿南北美洲西海岸、阿留申群岛、转向西南到日本列岛；然后分为东西两支，西支经过我国台湾省、菲律宾至印度尼西亚，东支经过马里亚纳群岛至新几内亚；两支会合后，经所罗门群岛至汤加，再向南转向新西兰。

(2) 欧亚地震带（地中海-南亚地震带） 这一活动带的震中分布大致与山脉走向一致。它西起大西洋的亚速岛，经意大利、土耳其、伊朗、印度北部、我国西部和西南地区，过缅甸至印度尼西亚与环太平洋地震带相衔接。除分布在环太平洋地震活动带的中深源地震以外，几乎所有其他中深源地震和一些大的浅源地震都发生在这一地震活动带。

此外，沿北冰洋、大西洋和印度洋中存在的一些洋脊地震带，沿着洋底的隆起的山脉延伸；还有地震相当活动的断裂谷，如东非洲和夏威夷群岛等。

2. 我国的地震活动

我国东临环太平洋地震带，南接欧亚地震带，地震区域分布很广，是一个多地震的国家。图 1-4 给出了我国历史上震级大于 6 级的地震活动分布图，由图可见，地震活动呈现带状分布，主要地震带主要有两条：

(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，纵贯南北。地震带宽度各处不一，大致在数十至上百公里左右，分界线是由一系列规模很大的断裂带及断陷盆地组成，构造相当复杂。

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

由此，我国大致可划分成 10 个地震活动区：①台湾及其附近海域地震区；②南海地震区；③华南地震区；④华北地震区；⑤东北地震区；⑥青藏高原南部地震区；⑦青藏高原中部地震区；⑧青藏高原北部地震区；⑨新疆中部地震区；⑩新疆北部地震区。

综合以上，由于我国所处的地理环境，使得地震情况比较复杂。从历史地震状况来看，全国除个别省份外，绝大部分地区都发生过较强的破坏性地震，有不少地区地震活动仍相当强烈，如我国台湾、新疆、西藏，西南、西北，华北和东南沿海地区都是破坏性地震多发的地区。我国地震带的分布是制定中国地震重点监视防御区的重要依据。

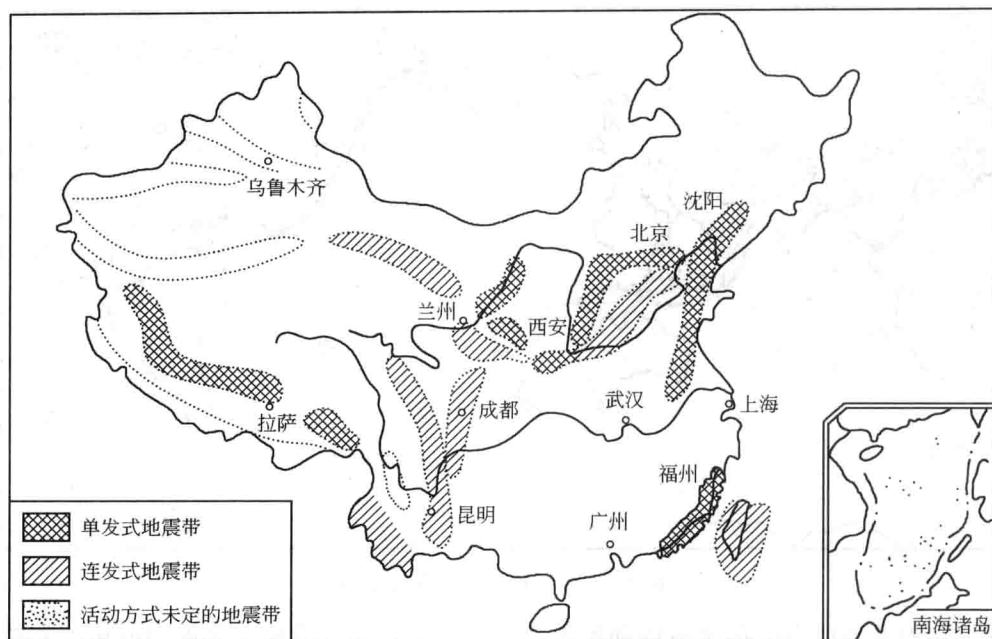


图 1-4 中国地震分布示意图

第二节 地震强度与地震区划

一、地震强度

1. 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并释放能量，这就是地震波。地震波是震源辐射的弹性波，根据其在地球中传播的路径不同，可以分为在地球内部传播的体波和只限于在地面附近传播的面波。

体波又可以根据介质质点振动方向与波传播方向的不同分为纵波和横波。

纵波是由震源向四周传递的压缩波，质点的振动方向与波的传播方向一致，如图 1-5(a) 所示，它可以在固体和液体里传播。纵波的特点是周期短、振幅小、波速快，在地面上引起上下颠簸。由于其波速快，在地震发生时最先到达，因此也叫初波、P 波 (Primary wave)。

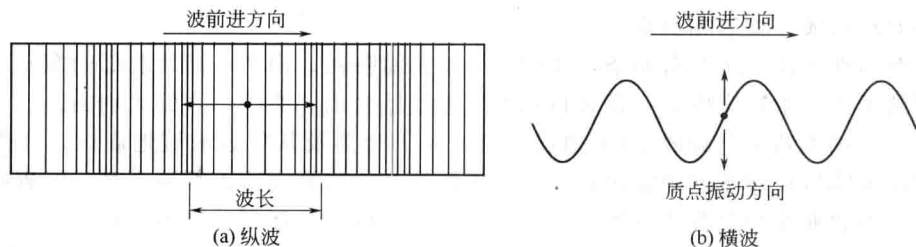


图 1-5 体波质点振动形式

横波是由震源向四周传递的剪切波，质点的振动方向与波的前进方向垂直，如图 1-5(b) 所示。由于横波的传播过程是介质不断受剪变形的过程，因此横波只能在固体介质中传播。横

波的特点一般表现为周期较长、振幅较大、波速较慢，引起地面水平方向的运动。由于横波波速较慢，在地震发生时到达的时间比纵波晚，因此也称为次波、S波（Secondary wave）。

根据弹性理论，纵波传播波速 v_P 和横波传播波速 v_S 可分别按下列公式计算：

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

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

式中， E 、 G 分别为介质的弹性模量和剪切模量； ρ 为介质的密度； ν 为介质的泊松比。在一般情况下，取 $\nu=0.25$ 时，

$$v_P = \sqrt{3}v_S \quad (1-3)$$

地表以下是多层介质，体波经过分层介质界面时，要产生反射和折射现象。经过多次反射和折射，地震波向上传播时逐渐转向垂直入射于地面，如图 1-6 所示。

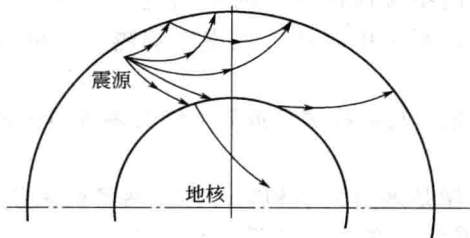


图 1-6 体波传播途径示意图

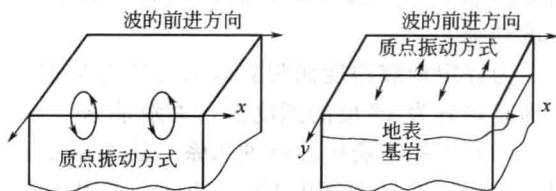


图 1-7 面波质点振动示意图

面波是体波经地层界面多次反射形成的次生波，它包括瑞雷波（R波）和乐甫波（L波）两种形式。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；乐甫波传播时，质点在地平面内产生与波前进方向相垂直的运动，在地面上表现为蛇形运动，见图 1-7。面波的传播速度较慢，周期长、振幅大、衰减慢，故能传播到很远的地方。面波使地面既产生垂直振动又产生水平振动。

地震波的传播速度以纵波最快，横波次之，面波最慢。所以在一般地震波记录上，纵波最先到达，横波次之，面波到达最晚，一般当横波或面波到达时地面震动最强烈。

2. 地震强度度量

(1) 地震震级 地震震级是表征地震强弱的指标，是地震中震源释放能量多少的尺度，是地震的基本参数之一，是地震预报和其他有关地震工程学研究中的一个重要参数。通常用地震时地面运动的振幅来确定地震震级。目前国际上比较通用的是里氏震级，最早是由美国学者里克特（C. F. Richter）于 1935 年提出的，其概念为：采用标准地震仪（周期为 0.8s，阻尼系数为 0.8，放大倍率为 2800 倍的地震仪），在距离震中 100km 处记录到的以微米为单位的最大水平地面位移的常用对数值来表示震级的大小，即

$$M = \lg A \quad (1-4)$$

式中 M ——地震震级，通常称为里氏震级；

A ——由地震仪记录到的地震曲线图上的最大振幅。

实际上地震发生时距震中 100km 处不一定有地震仪，且观测点也不一定采用标准地震仪。因此，对于距震中不是 100km，且采用非标准地震仪所确定的震级，需要进行适当修正。

一次地震只有一个震级，利用震级可以估计出一次地震所释放出的能量，震级 M 与地震释放的能量 E （单位为尔格）之间有如下关系：

$$\lg E = 11.8 + 1.5M \quad (1-5)$$

上式表明，震级相差一级，能量相差约 32 倍。

一般来说，小于 2 级的地震，人们感觉不到，只有仪器才能记录下来，称为微震；2~4 级地震，震中附近有感，称为有感地震；5 级以上的地震，能引起不同程度的破坏，称为破坏地震；7 级以上的地震，称为强烈地震；8 级以上的地震叫做特大地震。到目前为止，世界上记录到的最大地震的震级为 8.9 级，为 1960 年发生于南美洲的智利和 2004 年发生于印度尼西亚苏门答腊岛附近海域的两次大地震。

(2) 地震烈度 地震烈度 I 是指某一地区的地面和各类建筑物遭受一次地震影响的强弱程度，是衡量地震引起的后果的一种度量，目前主要是根据地震时人们的感受、器物的反应、建筑物破损程度和地貌变化特征等宏观的地震影响和破坏现象及水平向地震动参数（峰值加速度、峰值速度）来综合判定。因此，地震烈度是地震破坏作用大小的一个总的评价。对于一次地震来说，震级只有一个，但相应这次地震的不同地区则有不同的地震烈度。一般说来，震级越大，震中烈度越高；距震中越远，地震影响越小，地震烈度越低。

为评定地震烈度而建立起来的标准叫做地震烈度表。目前我国和世界上绝大多数国家采用的是划分为 12 度的烈度表，见附录 A。

(3) 震级与震中烈度的关系 震中烈度一般可看做是地震大小和震源深度两者的函数。对于浅源地震（震源在 10~30km），震中烈度 I_0 与震级 M 的大致对照关系见表 1-1。

表 1-1 震中烈度与震级的大致关系

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

上面的对照关系也可以用经验公式给出：

$$M = 0.58I_0 + 1.5 \quad (1-6)$$

二、地震区划

地震区划就是地震区域的划分，地震区划图是指在地图上按地震情况的差异，划分不同的区域。工程抗震的目标是减轻工程结构地震破坏，降低地震灾害损失。减轻灾害的有效措施就是对已有工程进行抗震加固和对新建工程进行抗震设防。由于地震在发生的空间、强度、时间等方面有很大的随机性，因此目前采取的方法是基于概率含义的地震预测。该方法将地震的发生及其影响视为随机现象，根据区域地质构造、地震活动性和历史地震资料，划分潜在震源区，分析震源地震活动性，确定地震衰减规律，利用概率方法评价某一地区未来一定期限内遭受不同强度地震影响的可能性，给出以概率形式表达的地震烈度区划。

我国于 2001 年 8 月颁布了《中国地震动参数区划图》（GB 18306—2001），该图根据地震危险性分析方法，提供了 II 类场地上，50 年超越概率为 10% 的地震动参数，给出了地震动峰值加速度分区图和地震动反应谱特征周期分区图。《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）提供了与《中国地震动参数区划图》相对应的我国主要城市地震动参数值，作为工程结构抗震设防的依据，2008 年颁布了最新版。

第三节 地震的活动性与地震震害

一、地震的活动性

(1) 地震作用的随机性 就目前对地震的认识水平而言,地震的发生和地震作用的特性都不能精确地给出,必须以概率为基础进行推测。我国现行的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)提出了三个烈度水准的设防要求,就是运用概率的方法对抗震规范中的“小震”、“设防烈度地震”和“大震”的概率意义和取值进行了分析而得出的。

(2) 地震作用随建筑结构特性变化而变化的特性 对于一个具体的建筑结构,在地面运动下,该结构将发生振动,在结构上的各个点将会发生位移、速度和加速度。结构的地震作用和结构的振动密切相关,而结构的振动和结构的质量分布、结构的刚度分布有关。

(3) 地震作用的短时性和往复性 一次地震引起的地面运动时间通常只有几十秒钟,而出现对结构振动影响较大的包含波峰的主振动则更短。地面运动的另一特点是当地面运动在某一方向达到峰值后,该方向的振动马上会减小。由于地震作用的短时性和往复性,地震作用下结构的破坏过程和静力荷载作用下结构的破坏过程是不一样的。

(4) 地震作用的复杂性 地震作用和地面运动的特性密切相关,而地面运动的特性则和发震机制、离开震中的距离、传播途径、场地土特性、局部地形等有关。

地震作用还与结构动力特性及其变化有关。对于高层建筑或者基础埋得较深的建筑,地震作用还与结构-基础-土体整体系统的动力特性和耗能特性有关。

鉴于地震作用的复杂性,仅仅通过抗震计算无法确保房屋抗震设防目标的实现,而抗震概念设计和抗震构造措施是除抗震计算以外的另两个重要手段。

二、地震震害

地震因为其发生突然、破坏惨重而被认为是威胁人类生存和发展的最大自然灾害之一。对地震震害进行分析可以发现,地震震害主要表现在三个方面,即地表破坏、建筑物破坏和因地震而引起的各种次生灾害。

1. 地表破坏

地震引起的地表破坏有地面裂缝、喷砂冒水、地陷及滑坡塌方等。

地面裂缝的数量、长短、深浅等与地震的强烈程度、地表情况、受力特征等因素有关,按成因可分为两种:一种为不受地形地貌影响的构造裂缝,这种裂缝是地震断裂带在地表的反映,其走向与地下断裂带一致,规模较大,裂缝带长可达几公里至几十公里,带宽几米到几十米;另一种为受地形、地貌、土质条件等限制的非构造裂缝,大多数沿河岸、陡坡边缘、沟坑四周和埋藏的古河道分布,即在地质松软的地方产生交错裂缝,大小形状不一,规模也较前一种小。地面裂缝往往都是地表受到挤压、伸张、旋扭等力作用的结果。地面裂缝穿过房屋会造成墙和基础的断裂或错位,严重时会造成房屋的倒塌。

地震时引起的喷砂冒水现象一般发生在沿海或地下水位较高的地区,地震的强烈震动会使含水层受到挤压,含水粉细砂层液化,地下水夹着砂子经裂缝或土质松软的地方喷出地面,形成喷砂冒水现象;地陷大多数发生在岩洞和地下采空地区(如采掘的地下坑道等),在喷砂冒水地段,也可能发生下陷;地震时引起的滑坡塌方常常发生在陡峭的山区,在强烈地震的摇动下,由于陡崖失去稳定而引起塌方、山体滑坡、山石滚落等现象。

2. 建筑物破坏

地震时各类建筑物所遭遇的破坏是造成人民生命财产损失的主要原因，其破坏类型与结构类型及抗震措施密切相关，是抗震工作的主要研究对象。主要破坏情况有以下三种：

(1) 建筑物的承重结构承载力不足及变形过大而造成的破坏 地震时，地震作用附加于建筑物或构筑物上，使其内力及变形增大，受力方式发生改变，导致建筑物或构筑物的承载力不足或变形过大而破坏。如墙体出现裂缝，钢筋混凝土柱剪断或混凝土被压酥裂，房屋倒塌等。

(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由各个构件之间的连接和构件之间的支撑来保证。地震作用下，由于节点强度不足、延性不够、锚固质量差等使结构丧失整体性而造成破坏。

(3) 地基失效引起的破坏 在强烈地震作用下，有些建筑物上部结构本身并无损坏。但是却由于地面裂缝、砂土液化、软土震陷等使得地基承载力下降，建筑物发生不均匀沉降，造成倾斜、倒塌破坏。

3. 次生灾害

在地震工程中，一般把由地震造成的直接灾害称为一次灾害，如建筑物的倒塌、地面破坏等；把由一次灾害诱发的灾害称为次生灾害。地震的次生灾害有火灾、水灾、海啸、滑坡、泥石流、毒气污染等。这种由于地震引起的间接灾害，有时比地震直接造成的损失还要大。如1923年日本关东大地震，倒塌房屋13万幢，震后引起的火灾却烧毁房屋45万幢；2004年12月26日印度尼西亚苏门答腊岛附近海域发生的8.9级特大地震，触发的海啸席卷了印度洋沿岸多国，死亡及失踪27万余人；2008年5月12日我国四川汶川地区发生的8.0级地震也产生了严重的次生灾害，川北特殊的地质条件引发了大量的山体滑坡，很多建筑物（包括桥梁）被滑落的各类山体埋掉或砸毁。

第四节 工程抗震设防

一、三水准的抗震设防准则

抗震设防就是指对建筑物进行抗震设计，并采取一定的构造措施，以达到结构抗震的效果和目的。工程抗震设防的基本目的就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，我国《建筑抗震设计规范》提出了“小震不坏，中震可修，大震不倒”三个水准的抗震设防目标。

第一水准：当遭受低于本地区抗震设防烈度的多遇地震（小震）影响时，建筑物一般不受损坏或不需修理可继续使用；

第二水准：当遭受相当于本地区抗震设防烈度的地震（中震）影响时，建筑物可能损坏，但经一般修理或不需修理仍可继续使用；

第三水准：当遭受高于本地区抗震设防烈度预估的罕遇地震（大震）影响时，建筑物不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。

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，认为我国地震烈度的概率分布符合极值Ⅲ型分布（如图1-8所示），概率密度函数为

$$f(I) = \frac{k(\omega - I)^{k-1}}{(\omega - \epsilon)^k} \cdot e^{-\left(\frac{\omega - I}{\omega - \epsilon}\right)^k} \quad (1-7)$$

式中 k ——形状参数，取决于一个地区地震背景的复杂性；

ω ——地震烈度上限值，取 $\omega = 12$ ；

ϵ ——地震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具体形状参数取决于设定的分析年限和具体地点。从概率统计上说,小震烈度是指发生机会较多的地震,故可将其定义为烈度概率密度函数曲线峰值点所对应的烈度,即众值烈度(亦称多遇烈度)。当分析年限取50年时,上述概率密度曲线的峰值点所对应的被超越概率为63.2%。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%。大震烈度是指罕遇地震烈度,它所对应的地震烈度在50年内的超越概率约为2%~3%。根据统计分析,多遇烈度比基本烈度约低1.55度,而罕遇烈度比基本烈度约高1度。

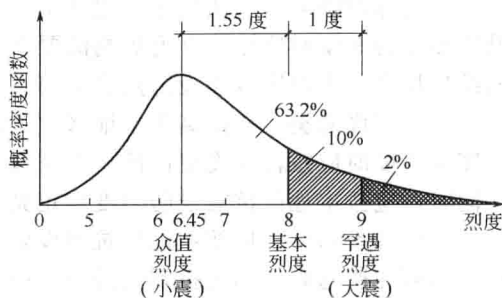


图 1-8 三种烈度含义及其关系

我国采用6度起设防的方针。《建筑抗震设计规范》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,见本书附录B。另外,为了反映潜在震源远近的影响,规范还同时给出了所在城镇的设计地震分组。这一划分使地震作用的计算更为细致。

二、二阶段的抗震设计方法

《建筑抗震设计规范》采用了两阶段设计方法以实现上述三个水准的抗震设防要求。

第一阶段设计:按多遇地震烈度对应的地震作用效应和其他荷载效应的组合验算结构构件的承载能力和结构的弹性变形,这样,既满足了在第一水准下具有必要的承载力可靠度,又满足了第二水准的损坏可修的目标。对于大多数结构,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的要求。

第二阶段设计:按罕遇地震烈度对应的地震作用效应验算结构的弹塑性变形。对特殊要求的建筑、地震时易倒塌的结构以及有明显薄弱层的不规则结构,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,实现第三水准的设防要求。

三、建筑物重要性分类和设防标准

1. 建筑物重要性分类

不同使用性质的建筑物,地震破坏造成后果的严重性是不一样的。因此,建筑物的抗震设防应根据其使用功能的重要性和破坏后果采用不同的设防标准。我国现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223—2008)将建筑工程按其重要性分为四个抗震设防类别:

(1) 特殊设防类 指使用上有特殊设施,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。简称甲类。

(2) 重点设防类 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。教育建筑中,幼儿园、小学、中学的教学用房以及学生宿舍和食堂,抗震设防类别应不低于重点设防类。

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

(4) 适度设防类 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要求的建筑。简称丁类。

2. 抗震设防标准